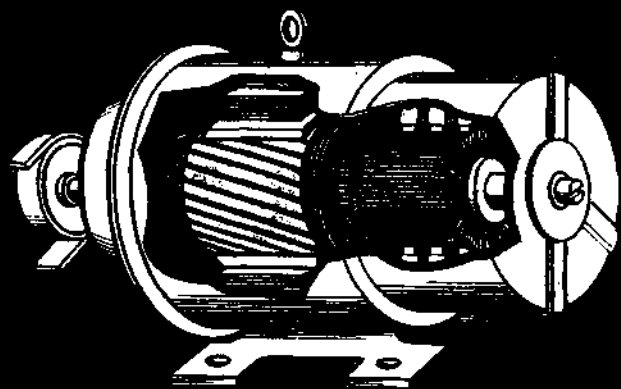


В. Є. Китаєв

ЕЛЕКТРО- ТЕХНІКА з основами промислової електроніки



ББК 31.2я722

К15

УДК 621.3

Рецензент — канд. пед. наук П. М. НОВИКОВ
Переклад з російської мови О. Г. ГРИЦЕНКА

У навчальному посібнику викладено основні закони електротехніки; розглянуто будову електровимірювальних приладів, трансформаторів, електричних машин постійного та змінного струму, приладів і пристроїв електроніки; наведено матеріали щодо двигунів і генераторів, польових транзисторів, транзисторних та тиристорних перетворювачів.

Для учнів професійних навчально-виховних закладів.

ПЕРЕДМОВА

Електротехніка — це наука, що вивчає способи використання електричних і магнітних явищ для практичних цілей. Однією з найважливіших галузей електротехніки є електроенергетика, яка розглядає питання виробництва електричної енергії (з інших видів енергії), передавання енергії на далекі відстані, розподілу її між споживачами та перетворення електричної енергії в інші види енергії — механічну, теплову, хімічну тощо. Розв'язання цих технічних завдань є основою електрифікації — широкого застосування електричної енергії в народному господарстві та побуті.

Електроніка — це галузь електротехніки, що базується на використанні електричних явищ у вакуумі, газах та інших середовищах. Електроніка розглядає питання технічного використання електронних ламп, напівпровідникових та іонних приладів, фотоелементів, сонячних батарей і інших пристроїв у апаратурі, яка перетворює енергію, керує верстатами, потоковими лініями, а також здійснює контроль за ними.

Якщо електроніка існує лише кілька десятиріч, то в електротехніці й електроенергетиці значно довший термін життя. Швидкого розвитку електроенергетика й електротехнічна промисловість набули з початком ХХ століття. Зараз електрифікація є надійним фундаментом для підвищення продуктивності праці, розвитку народного господарства і зростання добробуту людей.

На основі електрифікації все ширше впроваджуються комплексна механізація й автоматизація виробничих процесів. Інтенсивно розвивається електротехнологія — електротермічні й електролітичні способи одержання й обробки металів. З кожним роком стають до ладу все нові й нові автоматичні лінії машин, цехи й заводи-автомати. За допомогою електроенергії здійснюються електрозварювання, загартування сталі струмом високої частоти.

Сучасна електроніка дає змогу створювати мініатюрні пристрої для обчислювальних машин і різноманітних автоматів, для керування виробничими процесами та контролю за ними.

Автоматизація виробничих і технологічних процесів проводиться на базі широкого використання електронних, напівпровідникових та

К 4307000000-050 Без оголош.
203-94

- © Видавництво «Высшая школа», 1980.
- © Видавництво «Высшая школа», 1985,
зі змінами.
- © Видавництво «Будівельник», 1984,
переклад.

ISBN 5-7705-0626-1

Іонних приладів, які призначені для регулювання, контролю й керування цими процесами. Швидкий розвиток електронної обчислювальної техніки дає змогу удосконалювати роботу автоматичного керування й розв'язувати економічні завдання важливого народногосподарського значення. Електротехнічні пристрої одержання, переробки, передавання й відтворення інформації є найважливішими елементами технічних засобів автоматизованих систем керування.

Широке застосування електротехнічних та електронних пристроїв у різних галузях народного господарства неможливе без кваліфікованих кадрів, які повинні знати і з умінням використовувати основні закони електротехніки, будову та принцип дії машин постійного і змінного струму, трансформаторів, електровимірювальних приладів, а також електровакуумних та напівпровідникових приладів. Основні відомості в названих питань викладено у цій книзі.

Розділ I. ПОСТІЙНИЙ СТРУМ. КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

§ 1. ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Найпростіше електричне коло (рис. 1) складається із джерела електричної енергії E , приймача енергії P та двох лінійних проводів L_1 і L_2 , що з'єднують джерело з приймачем енергії. Лінійні проводи приєднуються до джерела електричної енергії за допомогою двох затискачів, які називаються позитивним (+) і негативним (—) полюсами.

Джерело електричної енергії перетворює механічну, хімічну, теплову чи іншу енергію в електричну. У приймачі електрична енергія перетворюється в енергію іншого виду — механічну, теплову, хімічну, світлову та ін. Джерелами електричної енергії служать генератори (електричні машини, що приводяться в рух будь-якими механічними двигунами), акумулятори та гальванічні елементи, умовні позначення яких показано на рис. 2. Приймачами електричної енергії є освітлювальні лампи, електричні двигуни, електронагрівальні прилади тощо.

Гальванічні елементи чи акумулятори з'єднують між собою для складання батареї гальванічних елементів або батареї акумуляторів. Джерело електричної енергії з приєднаними до нього лінійними проводами та приймач енергії утворюють замкнене електричне коло, де відбувається безперервний рух зарядів, який називається е л е к т р и ч н и м с т р у м о м .

Постійний струм у металевих провідниках являє собою усталений поступальний рух вільних електронів у замкнутому колі. На схемах умовно прийнято позначати позитивні напрямки струму й напруги стрілками від плюса до мінуса.

У двох провідниках, що знаходяться один від одного на певній відстані, струм викликає механічні сили, які діють на ці провідники. Одиниця вимірювання сили струму — ампер (А). У Міжнародній системі одиниць (СІ) ампер — незмінювана сила струму, який, проходячи по двох паралельних прямолінійних провідниках безкінечної довжини та надзвичайно малого круглого перерізу, розташованих на відстані 1 м один від одного у вакуумі, викликає між цими провідниками силу $2 \cdot 10^{-7}$ Н (ньютон) на кожен метр довжини. Ньютон — це одиниця вимірювання сили за Міжнародною системою одиниць.

Сила електричного струму являє собою електричний заряд (вимірюваний у кулонах), що проходить крізь поперечний переріз провідника за одиницю часу. Якщо в провіднику протікає струм силою 1 А, то крізь поперечний переріз цього провідника протягом 1 с протікає заряд 1 Кл.

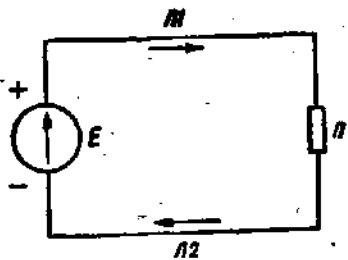


Рис. 1. Найпростіше електричне коло.

Лінійні проводи та приймач енергії становлять зовнішнє коло, в якому струм виникає від дії різниці потенціалів на затискачах джерела енергії і спрямовується від точки з вищим потенціалом (позитивного затискача) до точки з нижчим потенціалом (негативного затискача). Потенціал, як і різниця потенціалів, вимірюється у вольтах (В).

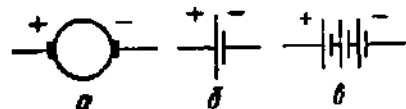


Рис. 2. Умовні позначення: а — генератор постійного струму; б — акумуляторів та гальванічних елементів; в — батареї акумуляторів і гальванічних елементів.

тенціалів на затискачах джерела енергії і спрямовується від точки з вищим потенціалом (позитивного затискача) до точки з нижчим потенціалом (негативного затискача). Потенціал, як і різниця потенціалів, вимірюється у вольтах (В).

§ 2. ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА

У замкненому колі електричний струм протікає під дією електрорушійної сили (ЕРС) джерела енергії. Електрорушійна сила виникає у джерелі і тоді, коли струму в колі немає, тобто коли коло розімкнене. У цьому разі ЕРС дорівнює різниці потенціалів на затискачах джерела енергії. Як і різниця потенціалів, ЕРС вимірюється у вольтах (В).

У замкненому і розімкненому електричному колі ЕРС безперервно підтримує різницю потенціалів на затискачах джерела енергії. Для безперервного протікання струму в замкненому колі потрібен рух зарядів всередині джерела у напрямку, зворотному дії сил електричного поля. Таке переміщення зарядів відбувається під дією сил, прикладених ззовні.

У наявності ЕРС можна переконатись, якщо до полюсів джерела енергії приєднати замість лінійних проводів прилад, який називається вольтметром. Стрілка вольтметра при цьому відхилиться на певний кут. Відхилення буде тим більшим, чим вища ЕРС джерела енергії. Проте вольтметр покаже не ЕРС, а, як ми побачимо нижче, напругу на затискачах джерела струму, яка, як і ЕРС, вимірюється у вольтах (В), кіловольтах (кВ), мілівольтах (мВ).

§ 3. ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОПІР

Спрямованому рухові електричних зарядів у будь-якому провіднику перешкоджають його молекули й атоми. Тому і зовнішнє коло, і саме джерело енергії становлять перешкоду для проходження струму. Протидія електричного кола проходженню електричного струму називається електричним опором (або просто опором).

Джерело електричної енергії, що входить в замкнене електричне коло, витрачає енергію на подолання опору зовнішнього та внутрішнього кіл.

Електричний опір позначається літерою R (r) і на схемах зображується так, як показано на рис. 3, а. Пристрої, що входять в електричне коло і мають опір, називаються резисторами.

Одиниця вимірювання опору — ом. Електричний опір лінійного провідника, у якому за незмінної різниці потенціалів 1 В протікає струм силою 1 А, дорівнює 1 Ом, тобто $1 \text{ Ом} = 1 \text{ В}/1 \text{ А}$. У разі вимірювання великих опорів використовують одиниці в тисячу та в мільйон разів більші від ома. Вони називаються кілоомом (кОм) та мегаомом (МОм): $1 \text{ кОм} = 1000 \text{ Ом}$; $1 \text{ МОм} = 1\,000\,000 \text{ Ом}$.

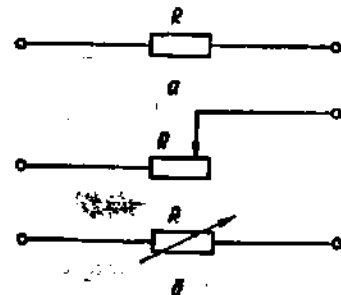


Рис. 3. Умовні позначення: а — резистор (опору); б — реостат.

Опір провідників електричному струмові залежить від матеріалу, з якого вони виготовлені, а також від довжини та площі поперечного перерізу провідника. Якщо порівняти два провідники, виготовлені з одного й того ж матеріалу, то довший провідник матиме більший опір за однакових площ поперечних перерізів, а провідник із більшим поперечним перерізом матиме менший опір за однакових довжин.

Електричні властивості матеріалу провідника оцінюють питомим опором, тобто опором провідника довжиною 1 м і площею поперечного перерізу 1 мм^2 . Питомий опір позначають літерою ρ .

Якщо провідник, виготовлений із матеріалу з питомим опором ρ , має довжину l метрів і площу поперечного перерізу s квадратних міліметрів, то опір усього провідника

$$R = \rho l/s.$$

Опір провідників залежить від температури; при цьому опір металевих провідників з підвищенням температури збільшується. Для кожного металу існує певний, так званий температурний, коефіцієнт опору α , який виражає приріст опору провідника в разі зміни температури на 1°C , віднесений до 1 Ом початкового опору.

Співвідношення між опором R_2 та R_1 з різними температурами T_2 та T_1 :

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)].$$

Слід мати на увазі, що це співвідношення справедливе за температур, нижчих від 100°C .

Регульовані опори називаються реостатами. Їх виготовляють із дроту з великим питомим опором, наприклад з ніхрому. Опір реостатів може змінюватись рівномірно або ступенево. На схемах реостати позначають так, як показано на рис. 3, б.

Здатність провідника пропускати електричний струм характеризується провідністю g , значення якої обернено пропорційна опором. Одиниця вимірювання провідності — сименс ($\text{См} = 1/\text{Ом}$).

Співвідношення між опором та провідністю провідника: $g = 1/R$; $R = 1/g$.

Величина, обернена питомому опором матеріалу провідника, називається питомою провідністю і позначається літерою γ . Отже, між питомим опором та питомою провідністю матеріалу існують такі співвідношення: $\gamma = 1/\rho$; $\rho = 1/\gamma$.

§ 4. ЗАКОН ОМА

Співвідношення між ЕРС, опором і силою струму в замкненому колі виражається законом Ома, який можна сформулювати так: сила струму в замкненому колі прямо пропорційна електрорушійній силі й обернено пропорційна опором всього кола.

Струм у колі виникає під дією ЕРС; чим більша ЕРС джерела енергії, тим вища сила струму в замкненому колі. Опір кола перешкоджає проходженню струму, отже, чим більший опір кола, тим менша сила струму.

Закон Ома можна виразити формулою

$$I = E/(R + R_0) \quad \text{або} \quad E = I(R + R_0),$$

де R — опір зовнішньої частини кола; R_0 — внутрішній опір джерела.

У цих формулах сила струму виражена в амперах, ЕРС — у вольтах, опір — в омах.

Для вимірювання малої сили струму замість ампера застосовують одиницю, в тисячу разів меншу від нього — міліампер (мА): $1 \text{ А} = 1000 \text{ мА}$.

Опір усього кола $R + R_0 = E/I$.

Закон Ома справедливий не лише для всього кола, але й для будь-якої ділянки. Якщо на ділянці кола немає джерела енергії, то позитивні заряди на цій ділянці переміщуються від точки з вищим потенціалом до точок з нижчим потенціалом. Джерело енергії витрачає певну кількість енергії, підтримуючи різницю потенціалів між почат-

ком і кінцем цієї ділянки. Така різниця потенціалів називається напругою між початком і кінцем ділянки.

Отже, застосовуючи закон Ома для ділянки кола, маємо $I = U/R$. Закон Ома можна сформулювати таким чином: сила струму на ділянці електричного кола дорівнює напрузі на її затискачах, поділеній на опір цієї ділянки.

Напруга на ділянці кола дорівнює добуткові сили струму на опір цієї ділянки, тобто $U = IR$.

З виразу закону Ома для замкненого кола маємо

$$E = IR + IR_0 = U + IR_0,$$

де IR — спад напруги в опорі R , тобто в зовнішньому колі, або інакше, напруга на затискачах джерела енергії (генератора) U ; IR_0 — спад напруги на опорі R_0 , тобто всередині джерела енергії (генератора).

Для вимірювання сили струму в колі використовують амперметр (міліамперметр). Напругу, як зазначалось вище, вимірюють вольтметром. Щоб приєднати амперметр, електричне коло розривають і в місці розриву кінці провідників з'єднують із затискачами амперметра (рис. 4). Отже, через прилад проходить весь вимірюваний струм. Вольтметр показує спад напруги на даній ділянці. Якщо вольтметр приєднати на початку зовнішнього кола, тобто до позитивного полюса джерела енергії, то він покаже спад напруги у всьому зовнішньому колі, який одночасно буде напругою на затискачах джерела енергії.

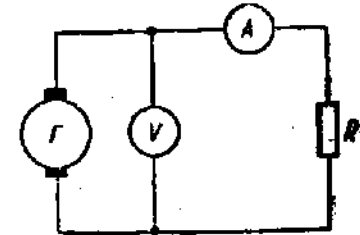


Рис. 4. Схема вимірювання амперметра і вольтметра.

Напруга на затискачах джерела енергії (генератора) дорівнює різниці між ЕРС та спадом напруги на внутрішньому опорі цього джерела, тобто $U = E - IR_0$.

Якщо зменшувати опір зовнішнього кола R , то опір усього кола $R + R_0$ також зменшиться, а сила струму в колі збільшиться. Зі збільшенням сили струму спад напруги всередині джерела енергії IR_0 зростатиме, оскільки внутрішній опір R_0 джерела енергії залишається незмінним. Отже, зі зменшенням опору зовнішнього кола напруга на затискачах джерела енергії також зменшиться. Якщо з'єднати затискачі джерела енергії з провідником, опір якого практично дорівнює нулеві, то сила струму в колі $I = E/R_0$. Цей вираз визначає найбільшу силу струму, яку можна одержати в колі даного джерела. Режим, за якого опір зовнішнього кола практично дорівнює нулеві, називається коротким замиканням.

Для джерел енергії з малим внутрішнім опором, наприклад для електричних генераторів (електромашин) та кислотних акумуляторів,

коротке замикання надто небезпечно — воно може вивести з ладу ці джерела. Коротке замикання може виникнути, наприклад, внаслідок пошкодження ізоляції проводів, що з'єднують приймач із джерелом енергії. Позбавлені ізолюючого покриття металеві (звичайно мідні) лінійні проводи, доторкуючись один до одного, утворюють дуже малий опір, який порівняно з опором приймача дорівнює нулеві.

Щоб уберегти електротехнічну апаратуру від струмів короткого замикання, застосовують різноманітні захисні пристрої.

§ 5. ПОСЛІДОВНЕ З'ЄДНАННЯ РЕЗИСТОРІВ

В електричному колі може бути кілька приймачів енергії, які мають різний опір.

Припустимо, що зовнішнє коло генератора (рис. 5) складається з трьох приймачів енергії з опором R_1 , R_2 , R_3 . Таке з'єднання приймачів, за якого кожен із них по чергово

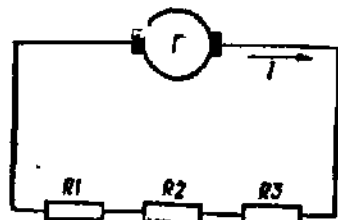


Рис. 5. Послідовне з'єднання резисторів.

ввімкнений в одне замкнене електричне коло, називається **послідовним**. Очевидно, що сила струму при цьому в усіх приймачах однакова, а опір зовнішнього кола дорівнює сумі опорів провідників. Для нашого випадку формула закону Ома має такий вигляд: $I = E / (R_0 + R_1 + R_2 + R_3)$.

Отже, в разі наявності трьох послідовно з'єднаних провідників загальний опір кола $R = R_0 + R_1 + R_2 + R_3$.

а опір зовнішнього кола $R' = R_1 + R_2 + R_3$.

Напруга на затискачах джерела енергії дорівнює напрузі, прикладеній до зовнішнього кола, тобто $U = E - IR_0 = I(R_1 + R_2 + R_3)$, де IR_0 — спад напруги на внутрішньому опорі джерела енергії.

Напруга на затискачах послідовно з'єднаних приймачів енергії дорівнює добуткові сили струму на опір приймача, тобто $U_1 = IR_1$; $U_2 = IR_2$; $U_3 = IR_3$; $U_1 + U_2 + U_3 = U$.

Отже, сума напруг на послідовно з'єднаних приймачах дорівнює напрузі на затискачах джерела енергії.

Оскільки на всіх ділянках кола, що складається з послідовно з'єднаних приймачів, сила струму однакова, то напруги прямо пропорційні їхнім опорам або обернено пропорційні провідностям, тобто $U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3 = 1/g_1 : 1/g_2 : 1/g_3$.

У разі незмінної напруги сила струму залежить від опору кола. Тому зміна опору одного з послідовно приєднаних приймачів спричиняє зміну загального опору всього кола і сили струму в ньому. При цьому змінюються напруги на всіх приймачах.

Послідовне приєднання додаткових резисторів використовують на практиці для зниження напруги (пускові та регулювальні реостати), а також для розширення меж вимірювання вимірювальних приладів, наприклад вольтметрів.

§ 6. ПЕРШИЙ ЗАКОН КІРХГОФА

Для електричного кола, що складається з послідовно з'єднаних джерела та приймача енергії, співвідношення між силою струму, ЕРС та опором усього кола або між силою струму, напругою та опором на якійсь ділянці кола визначається законом Ома. Проте на практиці використовуються переважно такі кола, в яких струм від певного пункту може проходити різними шляхами і в яких, отже, є точки, де сходяться кілька провідників. Ці точки називаються **вузлами** (вузовими точками), а ділянки кола, що з'єднують два сусідні вузли, — **відгалуження**ми кола. В жодній точці замкненого електричного кола не можуть накопичуватися електричні заряди, бо це обумовило б зміну потенціалів у його точках. Тому кількість електричних зарядів, що надходять до якогось вузла за одиницю часу, дорівнює кількості зарядів, що відходять від цього вузла за ту саму одиницю часу.

Припустимо, що у вузлі *a* (рис. 6) коло розгалужується на чотири відгалуження, які знову сходяться у вузлі *b*. Силу струму позначимо у нерозгалуженій частині кола через I , а у відгалуженнях — відповідно I_1 , I_2 , I_3 , I_4 . Між цими силами струму буде таке співвідношення: $I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$.

Якщо у вузлі сходяться кілька провідників з різними напрямками струму, то в лівій частині рівності буде сума сил струмів, що підходять до вузла, а у правій — сума сил струмів, що відходять від нього. Цей вираз являє собою перший закон Кірхгофа, який можна сформулювати так: *сума сил струмів, що підходять до вузла (вузлової точки) електричного кола, дорівнює сумі сил струмів, що відходять від цього вузла, або алгебраїчна сума сил струмів у вузловій точці електричного кола дорівнює нулеві*, причому струми, що підходять до вузла, вважаються додатними, а ті, що відходять від нього, — від'ємними.

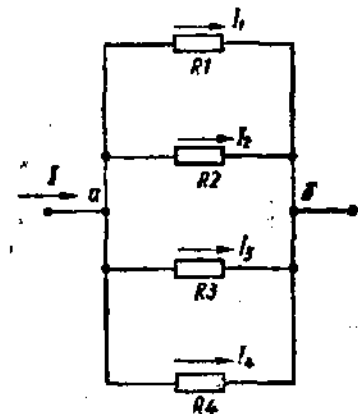


Рис. 6. Розгалужене коло.

§ 7. ПАРАЛЕЛЬНЕ Й ЗМІШАНЕ З'ЄДНАННЯ РЕЗИСТОРІВ

Паралельно з'єднаними називаються елементи електричного кола, що перебувають під однією й тією самою напругою. При паралельному з'єднанні резисторів (див. рис. 6) струм розподіляється по чотирьох відгалуженнях, що зменшує загальний опір або збільшує загальну провідність кола, яка дорівнює сумі провідностей окремих відгалужень. У цьому можна легко переконатися, якщо уявити збільшення кількості паралельно з'єднаних провідників як збільшення площі поперечного перерізу провідника, по якому проходить струм. Отже, позначивши провідність усіх провідників у сукупності літерою g , а кожного окремого провідника — g_1, g_2, g_3 та g_4 , матимемо рівність $g = g_1 + g_2 + g_3 + g_4$.

Оскільки провідність є величиною, оберненою опоріві, цей вираз можна записати у вигляді $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4$.

У цьому виразі R являє собою загальний або еквівалентний опір чотирьох паралельно з'єднаних резисторів, який менший від будь-якого з чотирьох заданих.

Доведемо одержане співвідношення. Позначивши силу струму у нерозгалуженій лінії літерою I , сили струмів у окремих відгалуженнях — відповідно I_1, I_2, I_3 та I_4 , напругу між точками a і b — U , а загальний опір між цими точками — R , на основі закону Ома запишемо такі рівності: $I = U/R$; $I_1 = U/R_1$; $I_2 = U/R_2$; $I_3 = U/R_3$; $I_4 = U/R_4$.

Згідно з першим законом Кірхгофа, $I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$ або $U/R = U/R_1 + U/R_2 + U/R_3 + U/R_4$.

Скоротивши обидві частини одержаного виразу на U , остаточно матимемо $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4$, що й треба було довести.

Таке співвідношення справедливе для будь-якої кількості паралельно з'єднаних резисторів. У окремому випадку, коли в електричному колі є два паралельно з'єднані резистори з опором R_1 та R_2 , можна записати рівність $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$, звідки опір, яким можна замінити два паралельно з'єднані резистори, $R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$.

Цей вираз має велике практичне застосування: його можна сформулювати так: опір двох паралельно з'єднаних приймачів енергії дорівнює добутку їх опорів, поділеному на суму тих же опорів.

Якщо паралельно з'єднано n однакових резисторів R , то загальний опір такого кола буде в n разів меншим від опору одного резистора, тобто $R_{\text{заг}} = R/n$.

Повертаючись до рис. 6, запишемо такі співвідношення: $I_1 R_1 = U$; $I_2 R_2 = U$; $I_3 R_3 = U$; $I_4 R_4 = U$. Через те що праві частини цих рівностей однакові, то й ліві також будуть однаковими: $I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3 = I_4 R_4$.

З цих рівностей маємо такі співвідношення: $I_1/I_2 = R_2/R_1$; $I_1/I_3 = R_3/R_1$; $I_1/I_4 = R_4/R_1$ і т. д.

Ці співвідношення показують, що в електричному колі з паралельно з'єднаними резисторами струм розподіляється обернено пропорційно цим опорам або прямо пропорційно провідності провідників. Отже, чим більше значення приєданого паралельно опору (резистора), тим менша сила струму в ньому і навпаки.

Якщо напруга між вузлами не змінюється, то сили струму в резисторах, розміщених між цими вузлами, на відміну від їх послідовного з'єднання, не залежать одна від одної. Вимкнення одного або кількох резисторів із кола не відбивається на роботі резисторів, що залишилися. Тому освітлювальні лампи, електродвигуни та інші приймачі електричної енергії приєднують в основному паралельно.

На ділянці електричного кола паралельне з'єднання призводить до зміни сили струму як у всьому колі, так і в розглядуваній ділянці.

Наприклад, за послідовного з'єднання резисторів з опором $R_1 = 10$ Ом та $R_2 = 30$ Ом у мережі з напругою $U = 120$ В (рис. 7) сила струму в колі $I = U / (R_1 + R_2) = 120 / (10 + 30) = 3$ А. Якщо паралельно резистору з опором R_2 приєднати резистор з опором $R_3 = 60$ Ом, то сила струму зміниться в нерозгалуженому колі і в резисторі з опором R_2 . Опір двох паралельних відгалужень $R_{23} = R_2 R_3 / (R_2 + R_3) = 30 \cdot 60 / (30 + 60) = 20$ Ом. Сила струму в нерозгалуженому колі $I_1 = U / (R_1 + R_{23}) = 120 / (10 + 20) = 4$ А. Сила струму в резисторі R_2 буде $I_2 = (U - I_1 R_1) / R_2 = (120 - 4 \cdot 10) / 30 = 2,67$ А.

Паралельне приєднання резистора на ділянці електричного кола використовується для зниження сили струму на даній ділянці. Зокрема, такий паралельно з'єднаний резистор, що називається шунтом, застосовується для розширення меж вимірювання сили струму амперметром. За наявності шунта в прилад відгалужується лише частина вимірюваного струму. Шунт в коло вмикають послідовно; паралельно шунту приєднують амперметр.

Якщо в електричному колі резистори, що з'єднані паралельно між собою, ввімкнені послідовно з іншими резисторами, то таке їх з'єднання називають змішаним. Щоб визначити загальний, або еквівалентний, опір кількох резисторів, з'єднаних змішано, спочатку знаходять опір паралельно або послідовно з'єднаних резисторів, а потім замінюють їх одним резистором з опором, що дорівнює знайденому. Наприклад, щоб визначити опір між точками a і b (див. рис. 7), спочатку знаходять опір між точками b і c : $R' = R_2 R_3 / (R_2 + R_3)$. Потім одержаний опір додають до опору R_1 : $R = R_1 + [R_2 R_3 / (R_2 + R_3)]$.

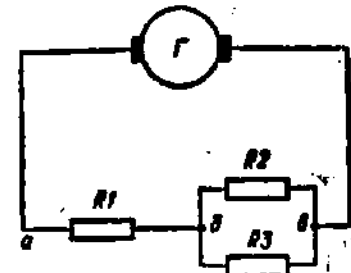


Рис. 7. Змішане з'єднання резисторів.

§ 8. ДРУГИЙ ЗАКОН КІРХГОФА

Другий закон Кірхгофа можна сформулювати так: у всякому замкненому електричному колі алгебраїчна сума всіх ЕРС дорівнює алгебраїчній сумі падів напруг на опорах, приєднаних послідовно в це коло, тобто

$$E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 + \dots + I_n R_n.$$

Для складання рівнянь довільно вибирають напрямок обходу кола і напрямок протікання струму.

Якщо в електричне коло ввімкнено два джерела енергії, ЕРС яких збігаються за напрямком, тобто ввімкнені згідно (рис. 8, а), то ЕРС

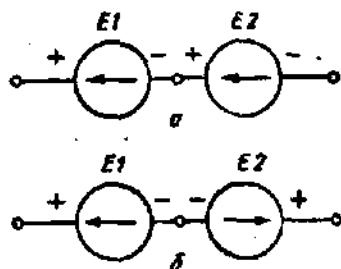


Рис. 8. З'єднання джерел електричної енергії:

а — згідно; б — зустрічно.

усього кола дорівнює сумі ЕРС цих джерел: $E = E_1 + E_2$. Якщо ж у коло ввімкнено два джерела, ЕРС яких мають протилежні напрямки, тобто ввімкнені зустрічно (рис. 8, б), то загальна ЕРС кола дорівнює різниці між ЕРС цих джерел: $E = E_1 - E_2$.

У разі послідовного ввімкнення в електричне коло кількох джерел енергії з різними напрямками ЕРС загальна ЕРС дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС усіх джерел. Додаючи, ЕРС одного напрямку беруть зі знаком плюс, а ЕРС протилежного напрямку — зі знаком мінус.

Замкнене коло є частиною складного кола (рис. 9, де замкнене коло позначено літерами а, б, в, г). Оскільки з точок а, б, в, г відходять відгалуження, то сили струмів I_1, I_2, I_3, I_4 , відрізняючись значеннями, можуть мати різні напрямки. Для такого кола, згідно з другим законом Кірхгофа, можна записати: $E_1 - E_2 - E_3 = I_1(R_{01} + R_1) + I_2(R_{02} + R_2) + I_3(R_{03} + R_3) + I_4 R_4$, де R_{01}, R_{02}, R_{03} — внутрішні опори джерел енергії; R_1, R_2, R_3, R_4 — опори приймачів енергії.

В окремому випадку, за відсутності відгалужень і послідовного з'єднання провідників, загальний опір дорівнює сумі всіх опорів.

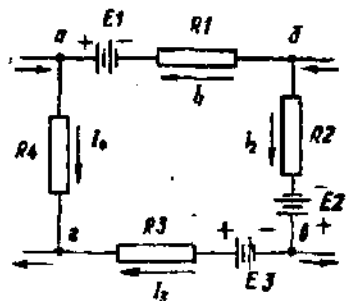


Рис. 9. Замкнене електричне коло.

Якщо зовнішнє коло джерела енергії з внутрішнім опором R_0 складається, наприклад, із трьох послідовно з'єднаних резисторів з опором відповідно R_1, R_2, R_3 , то на основі другого закону Кірхгофа можна записати: $E = I(R_0 + R_1 + R_2 + R_3)$. Якби було кілька джерел струму, то ліва частина цього рівняння являла б собою алгебраїчну суму ЕРС цих джерел.

За паралельного з'єднання двох чи більше джерел енергії сили струмів, що проходять у них, у загальному випадку неоднакові.

Якщо два паралельно з'єднані джерела енергії (рис. 10), які мають ЕРС E_1 та E_2 і внутрішні опори R_1 та R_2 , замкнуті на якийсь зовнішній опір R , то сили струмів у зовнішньому колі I і в джерелах I_1 та I_2 можна визначити з таких виразів: $I = I_1 + I_2$; $I = U/R$; $I_1 = (E_1 - U)/R_1$; $I_2 = (E_2 - U)/R_2$. Звідси сила струму у зовнішньому колі $I = (E_1 R_2 + E_2 R_1)/(R_1 R_2 + R R_1 + R R_2)$. Сили струмів, що протікають через перше і друге джерела енергії: $I_1 = (E_1 - IR)/R_1$; $I_2 = (E_2 - IR)/R_2$.

§ 9. РОЗРАХУНОК СКЛАДНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

У складному електричному колі може бути кілька замкнених контурів з будь-яким розміщенням джерел енергії та приймачів. Через те такі складні кола не можна звести до поєднання послідовних і паралельних з'єднань.

Використовуючи закон Ома та два закони Кірхгофа, можна знайти розподіл сил струмів і напруг на всіх ділянках будь-якого складного кола.

Одним із методів розрахунку складних електричних кіл є метод накладання струмів, суть якого полягає в тому, що сила струму в будь-якому відгалуженні являє собою алгебраїчну суму сил струмів, що утворюються в ній кожною окремою ЕРС кола. На рис. 11 зображено коло, у складі якого три джерела з ЕРС E_1, E_2 та E_3 і чотири послідовно з'єднані резистори R_1, R_2, R_3, R_4 . Якщо знехтувати

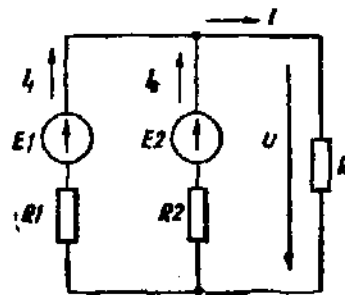


Рис. 10. Паралельне з'єднання джерел енергії.

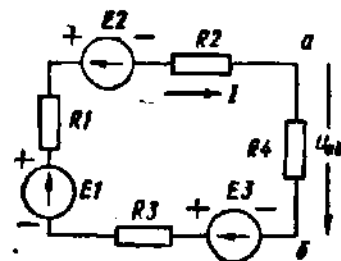


Рис. 11. Електричне коло з трьома джерелами енергії.

внутрішнім опором джерел енергії, то загальний опір кола $R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$. Припустимо спочатку, що ЕРС першого джерела $E_1 \neq 0$, а другого й третього $E_2 = 0$ і $E_3 = 0$. Потім візьмемо $E_2 \neq 0$, а $E_1 = 0$ і $E_3 = 0$. І нарешті приймемо $E_3 \neq 0$, а $E_1 = 0$ і $E_2 = 0$. У першому випадку сила струму в колі, який збігається за напрямком з ЕРС E_1 , дорівнює $I_1 = E_1/R$; у другому випадку струм у колі збігається за напрямком з ЕРС E_2 і $I_2 = E_2/R$; у третьому випадку сила струму $I_3 = E_3/R$ і збігається за напрямком з ЕРС E_3 . Оскільки ЕРС E_1 та E_2 збігаються за напрямком у контурі, то й струми I_1 та I_2 також збігаються, а струм I_3 має протилежний напрямок, через те що ЕРС E_3 спрямована зустрічно відносно ЕРС E_1 та E_2 . Отже, сила струму в колі

$$I = I_1 - I_2 + I_3 = E_1/R - E_2/R + E_3/R = (E_1 - E_2 + E_3)/(R_1 + R_2 + R_3 + R_4).$$

Напруга на будь-якій ділянці кола, наприклад між точками а і б, $U_{ab} = IR_4$.

Для визначення сили струму у всіх відгалуженнях кола треба знати опір відгалужень, а також значення і напрямки усіх ЕРС.

Перед складанням рівнянь за законами Кірхгофа треба довільно прийняти напрямки струмів у відгалуженнях і показати їх на схемі стрілками. Якщо дійсний напрямок струму в будь-якому відгалуженні протилежний вибраному, то після розв'язання рівнянь цей струм буде зі знаком мінус. Кількість потрібних рівнянь дорівнює кількості невідомих струмів, причому кількість рівнянь, що складаються за першим законом Кірхгофа, має бути на одиницю менша від кількості вузлів у колі; решта рівнянь складаються за другим законом Кірхгофа, причому слід вибрати найбільш прості контури і так, щоб у кожному з них було хоч одне відгалуження, яке не входило в раніше складені рівняння.

Розрахунок складного кола з застосуванням рівнянь, складених за законом Кірхгофа, розглянемо на прикладі двох паралельно з'єднаних джерел, замкнених на опір (див. рис. 10). Нехай ЕРС джерел $E_1 = E_2 = 120$ В, їх внутрішній опір $R_1 = 3$ Ом і $R_2 = 6$ Ом, опір навантаження $R = 18$ Ом.

Оскільки невідомо три сили струмів, то потрібно скласти три рівняння. При двох вузлових точках необхідне одне вузлове рівняння за першим законом Кірхгофа: $I = I_1 + I_2$. Друге рівняння запишемо при обході контура, який складається з першого джерела та опору навантаження: $E_1 = I_1 R_1 + IR$. Аналогічно запишемо третє рівняння: $E_2 = I_2 R_2 + IR$. Підставивши цифрові значення, маємо: 120 В $= 3I_1 + 18I$ та 120 В $= 6I_2 + 18I$. Оскільки $E_1 = E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2 = 3I_1 - 6I_2 = 0$, то $I_1 = 2I_2$ та $I = 3I_2$. Після підстановки цих значень у вираз для E_1 маємо $120 = 2I_2 \cdot 3 + 18 \cdot 3I_2 = 60I_2$, звідки $I_2 = 120/60 = 2$ А, $I_1 = 2I_2 = 4$ А, $I = I_1 + I_2 = 6$ А.

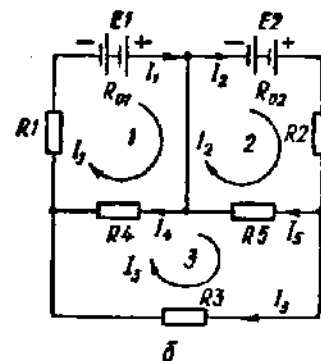
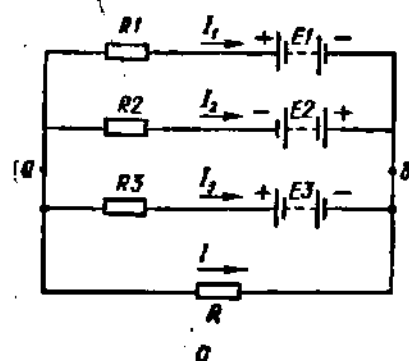


Рис. 12. Схеми для розрахунку складного електричного кола: а — за методом вузлових напруг; б — за методом контурних струмів.

У складному електричному колі з двома вузловими точками а і б (рис. 12, а) і складеному з кількох паралельно з'єднаних джерел енергії, що працюють на загальний приймач, зручно використати метод вузлових напруг. Позначивши потенціали у вузлових точках через φ_a і φ_b , напругу між цими точками U виразимо різницею цих потенціалів: $U = \varphi_a - \varphi_b$.

Якщо взяти за додатний напрямок ЕРС і струмів у відгалуженнях від вузла а до вузла б, то можна записати рівняння: $I_1 = (\varphi_a - \varphi_b - E_1)/R_1 = (U - E_1)g_1$; $I_2 = (\varphi_a - \varphi_b + E_2)/R_2 = (U + E_2)g_2$; $I_3 = (\varphi_a - \varphi_b - E_3)/R_3 = (U - E_3)g_3$; $I = (\varphi_a - \varphi_b)/R = Ug$.

На основі першого закону Кірхгофа для вузлової точки маємо $I_1 + I_2 + I_3 + I = 0$. Підставивши в цю суму значення сил струмів, знайдемо:

$$(U - E_1)g_1 + (U + E_2)g_2 + (U - E_3)g_3 + Ug = 0.$$

Звідси

$$U = (E_1 g_1 - E_2 g_2 + E_3 g_3)/(g_1 + g_2 + g_3 + g) = \Sigma E g / \Sigma g,$$

тобто вузлова напруга дорівнює алгебраїчній сумі добутків ЕРС і провідностей паралельних відгалужень, поділеній на суму провідностей усіх відгалужень. Обчисливши за цією формулою вузлову напругу і скориставшись виразом для сил струмів у відгалуженнях, легко визначити ці сили струмів.

Для визначення сил струмів у складних колах з кількома вузловими точками та ЕРС, застосовують метод контурних струмів, який дає змогу скоротити кількість рівнянь, що підлягають розв'язанню. Припускають, що у відгалуженнях, які входять до складу двох суміжних контурів, протікають два контурні струми, перший з яких являє собою струм одного з суміжних контурів, а другий — другого контуру. Дійсний струм на розглядуваній ділянці кола обумовлю-

153

ється сумою або різницею цих двох струмів залежно від їх взаємного відносного напрямку.

Використовуючи метод контурних струмів, складають рівняння, виходячи з суми опорів, що входять до складу даного контуру, та суми опорів, що входять до складу відгалуження, загального для суміжних контурів. Першу суму умовно позначають подвійним індексом, наприклад R_{11} , R_{22} і т. д., а другу суму — індексом, який містить номери контурів, для яких дана ділянка кола є спільною, наприклад R_{12} , R_{13} тощо.

Якщо у контурі є кілька джерел з ЕРС E_1 , E_2 , E_3 і т. д., то на основі другого закону Кірхгофа для цього контуру можна записати рівняння $E_1 \pm E_2 \pm E_3 \pm \dots = I_1 R_{11} + I_2 R_{12} + I_3 R_{13} + \dots$. У цьому рівнянні знак «+» або «-» беруть залежно від взаємного відносного напрямку ЕРС і струмів у контурі (при однаковому напрямку — плюс, при протилежному — мінус). Аналогічні рівняння можна записати для всіх контурів, що входять до складного електричного кола. Отже, алгебраїчна сума ЕРС кожного контуру дорівнює алгебраїчній сумі добутку сили струму в даному контурі на суму опорів усіх ланок, які його утворюють, та добутку сил контурних струмів, суміжних з даним контуром, на опори їх спільних ланок.

На рис. 12, б зображено складне електричне коло з трьома контурами. У колі є два джерела з ЕРС $E_1 = 12$ В, $E_2 = 8$ В і внутрішніми опорами $R_{01} = 4$ Ом, $R_{02} = 3$ Ом та п'ять опорів $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 29$ Ом, $R_3 = 40$ Ом, $R_4 = 8$ Ом, $R_5 = 16$ Ом.

Знаходимо опори: $R_{11} = R_1 + R_{01} + R_{13} = 20 + 4 + 8 = 32$ Ом; $R_{22} = R_2 + R_{02} + R_{23} = 29 + 3 + 16 = 48$ Ом; $R_{33} = R_3 + R_{31} + R_{32} = 40 + 8 + 16 = 64$ Ом; $R_{12} = R_{21} = 8$ Ом; $R_{23} = R_{32} = 16$ Ом.

На основі другого закону Кірхгофа складаємо рівняння: для контуру 1: $E_1 = I_1 R_{11} - I_2 R_{12}$; $12 = 32I_1 - 8I_2$; для контуру 2: $E_2 = I_2 R_{22} - I_3 R_{23}$; $8 = 48I_2 - 16I_3$; для контуру 3: $E_3 = I_3 R_{33} - I_1 R_{31} - I_2 R_{32}$; $0 = 64I_3 - 16I_1 - 16I_2 - 8I_3$.

Розв'язуючи ці рівняння, знаходимо: $I_1 = 0,4$ А; $I_2 = 0,2$ А; $I_3 = 0,1$ А; $I_4 = I_1 - I_2 = 0,3$ А; $I_5 = I_3 - I_2 = 0,1$ А.

§ 10. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Здатність тіла виконувати роботу називається енергією цього тіла. Наприклад, піднятий на висоту вантаж має певний запас енергії і, падаючи, виконує роботу. Енергія тіла тим більша, чим більшу роботу воно може виконати під час свого руху. Енергія не зникає, а переходить з однієї форми в іншу. Наприклад, електрична енергія може бути перетворена в механічну, теплову, хімічну, а механічна — в електричну і т. д.

Щоб перенести заряди в замкненому колі, джерело електричної енергії витрачає енергію, що дорівнює добуткові ЕРС джерела на електричний заряд, перенесений через це коло, тобто EQ .

Проте не вся ця енергія є корисною, тобто не вся робота, виконана джерелом енергії, передається приймачеві, бо частина її витрачається на подолання внутрішнього опору джерела і провідників. Отже, джерело енергії виконує корисну роботу $A = UQ$, де U — напруга на затискачах приймача.

Оскільки електричний заряд (кількість електрики) дорівнює добуткові сили струму в колі на час його проходження ($Q = It$), то формулу роботи можна записати у вигляді

$$A = UIt,$$

тобто електрична енергія, або робота, являє собою добуток напруги на силу струму в колі та на час його проходження.

Якщо напругу на затискачах ділянки кола виразити добутком сили струму на опір цієї ділянки ($U = IR$), то формулу роботи можна записати ще так:

$$A = I^2 R t.$$

Проте жодна з наведених формул не обумовилася розмірів генератора електричної енергії, від якого одержано цю роботу, через те що і великий і малий генератори можуть виконати однакову роботу, але за різні проміжки часу. Тому розміри генератора обумовлюються не виконаною роботою, а його потужністю. Це стосується будь-якого електричного апарата й машини — чи такого, що постачає електричну енергію, а чи такого, що споживає її (наприклад, електродвигуни, електричні лампи, нагрівальні прилади тощо).

Потужністю називається робота, яка виконується (або споживається) за одну секунду. Потужність виражається такими формулами:

$$P = A/t = UQ/t = UI = U^2/R = I^2 R.$$

Якщо у формулах роботи та потужності напруга виражена у вольтах, сила струму — в амперах, опір — в омах і час — в секундах, то робота виражається в ньютон-метрах або у ват-секундах (Вт · с), тобто у джоулях (Дж), а потужність — у ватах (Вт). Для вимірювання малих потужностей застосовують одиницю, в тисячу разів меншу від одного вата, — міліват (мВт); 1 Вт = 1000 мВт. Великі потужності вимірюють одиницями, в тисячу разів більшими за ват, — кіловатами (кВт); 1 кВт = 1000 Вт.

Оскільки джоуль є малою одиницею, то роботу виражають в більших одиницях — ват-годинах (Вт · год), гектоват-годинах (гВт · год) та кіловат-годинах (кВт · год). Співвідношення між цими одиницями та джоулем такі: 1 Вт · год = 3600 Дж; 1 гВт · год = 100 Вт · год; 1 кВт · год = 1000 Вт · год.

За дуже малого зовнішнього опору R сила струму в колі буде велика, а напруга на затискачах генератора — мала. Якщо опір зовнішнього кола R дорівнює нулеві, напруга на затискачах генератора U також дорівнює нулеві. Отже, і потужність P , що передається в зовнішнє коло, дорівнює нулеві.

За дуже великого зовнішнього опору (коли зовнішнє коло розімкнене, опір його нескінченно великий) сила струму в колі дорівнює нулеві і потужність, що передається в зовнішнє коло, теж дорівнює нулеві.

Отже, зі збільшенням опору зовнішнього кола потужність спочатку збільшується від нуля до якогось максимального значення, а потім зменшується до нуля.

Щоб одержати максимальну потужність у зовнішньому колі, опір його повинен дорівнювати внутрішньому опорі генератора. Проте слід мати на увазі, що, коли внутрішній опір генератора дорівнює опорі зовнішнього кола, корисна дія генератора незначна і робота за таких умов не економічна, через те що половина всієї потужності, яку може розвинути генератор, використовується на подолання внутрішнього опору.

Потужність, яку віддає джерело енергії в зовнішнє коло, є корисною потужністю P_2 , а потужність, одержувана джерелом ззовні (від джерела енергії механічної, хімічної тощо) — споживаною P_1 . Приймач електричної енергії, споживаючи енергію з мережі джерела електричної енергії, перетворює її в енергію іншого виду — механічну, теплову та ін.

Відповідно до закону збереження енергії корисна потужність джерела або приймача електричної енергії менша від потужності P_1 , споживаної ним, оскільки в процесі роботи джерела або приймача неминує втрачається частина перетворюваної ним енергії. У перетворювачах енергії втрата її відбувається внаслідок нагрівання проводів їхніх обмоток струмами, що протікають в них, внаслідок перемагнічування сталі, від вихрових струмів і т. д.

Для оцінки властивостей перетворювача енергії (джерела або приймача електричної енергії) служить коефіцієнт корисної дії (ККД, або видатність), який дорівнює відношенню корисної потужності джерела або приймача енергії P_2 до споживаної ним потужності P_1 :

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + \Delta P),$$

де ΔP — потужність, витрачувана на подолання втрат у джерелі чи приймачі енергії.

Цей вираз показує, що ККД джерела або приймача електричної енергії тим більший, чим менші втрати енергії в ньому.

§ 11. ЗАКОН ЛЕНЦА—ДЖОУЛЯ

Під час проходження електричного струму через металевий провідник електрони стикаються з нейтральними молекулами та з молекулами, що втратили електрони. Рухомий електрон або відщеплює від нейтральної молекули новий електрон, втрачаючи свою кінетичну енергію й утворюючи новий позитивний іон, або з'єднується з молекулою, яка втратила електрон (з позитивним іоном), утворюючи нейтральну молекулу. Під час зіткнення електронів з молекулами витрачається енергія, яка перетворюється в теплоту. Будь-який рух, за якого переборюється опір, вимагає витрат певної енергії. Наприклад, для переміщення якогось тіла долається опір тертя, і робота, витрачена на це, перетворюється в теплоту. Електричний опір провідника відіграє таку ж роль, що й опір тертя. Отже, для проходження струму через провідник джерело струму витрачає деяку енергію, яка перетворюється в теплоту. Перехід електричної енергії в теплову відображає закон Ленца — Джоуля, або закон теплової дії струму.

Російський учений Ленц та англійський фізик Джоуль одночасно і незалежно один від одного встановили, що під час проходження електричного струму по провіднику кількість теплоти, що виділяється провідником, прямо пропорційна квадратові сили струму, опорі провідника та часові, протягом якого електричний струм протікає по провіднику. Це положення називається законом Ленца — Джоуля.

Якщо позначити кількість теплоти, що утворюється струмом, літерою Q , силу струму, що протікає по провіднику, — I , опір провідника — R і час, протягом якого струм протікає по провіднику, — t , то закону Ленца — Джоуля можна надати такого виразу: $Q = I^2 R t$. Оскільки $I = U/R$ і $R = UI$, то

$$Q = U I t = U^2 t / R.$$

§ 12. НАГРІВАННЯ ПРОВІДНИКІВ ЕЛЕКТРИЧНИМ СТРУМОМ

На нагріванні провідників електричним струмом ґрунтується влаштування електричного освітлення, будова електронагрівальних приладів, електричних печей, багатьох типів вимірювальної, медичної апаратури тощо.

З усіх видів штучного освітлення найбільш поширена електрична лампа розжарення з металевою ниткою, винайдена О. М. Лодигініним у 1873 р. У такій лампі провідник під дією струму нагрівається до білого жару і внаслідок цього випромінює світло.

Основними частинами сучасної лампи розжарення є нитка розжарення та скляний балон (колба). Матеріалом для виготовлення нитки розжарення освітлювальних ламп служить вольфрам (з домішками оксиду торію та інших елементів). Цей метал має високу температуру плавлення (3660 °C) і велику механічну міцність.

Електричне нагрівання провідників не завжди знаходить корисне застосування. Так, у проводах ліній електропередач нагрівання пов'язане з некорисною витратою електричної енергії, а при великій силі струму може створювати небезпеку виникнення пожеж. Щоб запобігти надмірному нагріванню лінійних проводів, а також різних обмоток електричних машин та апаратів з ізолюваного дроту, для електричної апаратури встановлено норми максимальних сил струмів, що пропускаються по проводу чи обмотці.

Під час проходження струму по провіднику температура його швидко підвищується, бо різниця температур провідника й оточуючого середовища мала. Тому теплота, що випромінюється в середовище, незначна і витрачається переважно на нагрівання провідника. Зі збільшенням температури проводу зростає різниця температур проводу й оточуючого середовища, а також теплота, яку віддає провід в оточуюче середовище, тобто підвищення температури проводу сповільнюється. За деякої усталеної температури проводу настає рівновага поміж теплотою, що виділяється струмом, та теплотою, що віддається в оточуюче середовище. Сила струму, за якої встановлюється найбільша допустима температура проводу, називається допустимою силою струму. Найбільша допустима температура залежить від ізоляції про воду та способу його прокладання.

Розрахунок провідників за формулами, що ґрунтуються на законах нагрівання, дуже складний. Допустиму для даної сили струму площу перерізу провідника на практиці визначають за таблицями допустимих тривалих навантажень струму на проводи та кабелі, наведеними у Правилах устаткування електроустановок (ПУЕ). Прикладом цього може служити табл. 1.

Таблиця 1. Допустимі струмові навантаження для ізолюваних проводів

Площа поперечного перерізу провідників, мм ²	Допустима сила струму, А, для проводів		Площа поперечного перерізу провідників, мм ²	Допустима сила струму, А, для проводів	
	мідних	алюмінієвих		мідних	алюмінієвих
0,5	11	—	6	50	36
1	17	—	10	80	55
2,5	30	24	25	140	105
4	41	32	50	215	165

Провідник вибирають такого перерізу, щоб допустима сила струму його дорівнювала заданій чи розрахунковій силі струму або була більшою від неї.

Струм, протікаючи по провідниках, крім нагрівання їх, створює спад напруги, оскільки провідники мають опір. Якщо відстань між джерелом енергії та споживачем становить l , то довжина двох провідників, що з'єднують джерело енергії зі споживачем, дорівнює $2l$.

Опір провідників з площею перерізу s із матеріалу з питомим опором ρ становить $R = 2\rho l/s$, спад напруги в провідниках $\Delta U = IR = I\rho \cdot 2l/s$. Отже, напруга на затискачах споживача U_c буде меншою від напруги на початку лінії (джерела) $U_{дж}$. Різниця напруг на початку і в кінці лінії, яка дорівнює спаду напруги в провідниках, називається втратою напруги: $U_{дж} - U_c = \Delta U = IR$.

Будь-який приймач енергії дуже чутливий до змін напруги, тобто до відхилень її від номінального значення. Наприклад, яскравість лампи розжарення прямо пропорційна приблизно четвертому ступеню напруги, тобто зі зниженням напруги на 5 % світловий потік лампи розжарення зменшується на 18,5 %, а з підвищенням напруги на 5 % понад номінальне значення термін служби її скорочується вдвічі.

Коливання напруги для освітлювального навантаження не повинні перевищувати $-2,5...+5$ %, а для силового ± 5 , інколи ± 10 % її номінального значення. Отже, втрата напруги в лінії не повинна перевищувати тих же значень. Завдання розрахунку зводиться до вибору такої площі перерізу провідника, за якої забезпечується нормальна робоча напруга на затискачах споживачів електричної енергії, тобто потрібна площа перерізу провідників

$$s = 2\rho l I \Delta U.$$

Знайдена за цією формулою площа перерізу, заокруглена до найближчої більшої стандартної, повинна бути перевірена на допустиме нагрівання.

Для відносно коротких ліній (освітлювальні мережі промислових підприємств, громадських та житлових будиноків) площу перерізу провідників вибирають на основі нагрівання, оскільки втрата напруги завжди виявляється меншою за допустиму.

Втрата потужності в лінії електропередачі

$$\Delta P = \Delta UI = I^2 R.$$

Для захисту апаратів, машин та приладів від надміру великої сили струму встановлюють запобіжні пристрої (запобіжники, реле, автомати). Вони автоматично розривають коло, по якому надходить струм, як тільки сила струму перевищить норму.

§ 13. НЕЛІНІЙНІ ОПОРИ

Коло, опір якого не залежить від сили струму, що протікає по ньому, називається л і н і й н и м, а коло, опір якого залежить від сили струму, що протікає, називається н е л і н і й н и м.

Розрахунок сили струму і напруг у нелінійних колах виконують за допомогою вольт-амперних характеристик нелінійних опорів цих кіл. Вольт-амперна характеристика, що являє собою залежність між силою струму та прикладеною до нелінійного опору напругою, зобра-

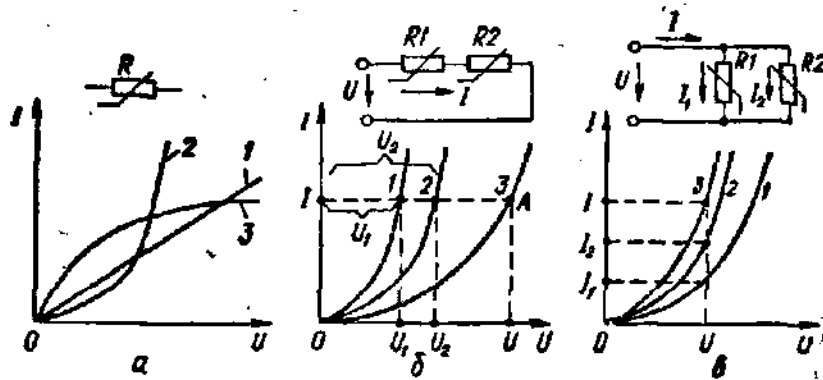


Рис. 13. Вольт-амперні характеристики та умови позначення нелінійних опорів:

а — для лінійного типу опорів; б — для двох послідовно з'єднаних опорів; в — для двох паралельно з'єднаних опорів.

жується графіком, побудованим на основі експериментальних даних (рис. 13, а).

Для лінійного опору вольт-амперна характеристика являє собою пряму 1, оскільки опір сталий і, згідно з законом Ома, між силою струму й напругою існує прямо пропорційна залежність. Для нелінійного опору вольт-амперна характеристика не прямолінійна і має вигляд або кривої 2, якщо опір елемента зменшується зі збільшенням сили струму (наприклад, електронні лампи, напівпровідникові діоди та стабілітрони), або кривою 3, якщо опір елемента збільшується зі збільшенням сили струму (нагрівальні прилади, лампи розжарення, батареї).

При послідовному з'єднанні двох нелінійних опорів $R1$ та $R2$ з вольт-амперними характеристиками 1 і 2 (рис. 13, б) сила струму в колі I є спільною для обох опорів, а прикладена напруга U в будь-який момент дорівнює сумі напруг на першому U_1 та другому U_2 нелінійних опорах, тобто $U = U_1 + U_2$. Беручи різні значення сили струму й визначаючи за кривими 1 і 2 відповідні їм значення напруг U_1 та U_2 , після їх додавання знаходимо напругу U , значення якої відповідають цим же значенням сили струму. Таким чином можемо побудувати вольт-амперну характеристику 3 для всього кола.

Якщо відома прикладена напруга U й потрібно визначити силу струму в колі та напругу на кожному нелінійному опорі, то на горизонтальній осі треба відкласти значення цієї напруги й поставити перпендикуляр до перетину з кривою 3 у точці А. Ця точка визначить силу струму в колі I , а відрізки на прямій, що паралельна горизонтальній осі, від осі сили струму до перетину з кривими 1 і 2 відповідатимуть напругам на опорах $R1$ і $R2$.

При паралельному з'єднанні нелінійних опорів $R1$ і $R2$ з вольт-амперними характеристиками 1 і 2 (рис. 13, в) сила струму в нерозгалуженій частині кола в будь-який момент дорівнює сумі сил струмів у цих опорах ($I = I_1 + I_2$), а напруга на затискачах кола U є спільною для обох опорів. Відкладаючи на горизонтальній осі значення напруги джерела енергії U і ставлячи перпендикуляр до перетину з кривими 1 і 2, знайдемо значення сил струму I_1 та I_2 , а їх сума визначить силу струму в нерозгалуженій частині кола.

Розглянутий метод розрахунку нелінійних кіл можна застосувати до будь-якої кількості послідовно або паралельно з'єднаних нелінійних опорів. У разі змішаного з'єднання нелінійних опорів усе роблять так, як і в розрахунку лінійних кіл, тобто спочатку знаходять опір паралельно або послідовно з'єднаних нелінійних опорів, замінюючи їх одним загальним.

Контрольні запитання

1. У яких одиницях вимірюють ЕРС, напругу та силу струму?
2. Від чого залежить опір металевого провідника?
3. Сформулюйте закон Ома для замкненого електричного кола та для його ділянки.
4. Яке співвідношення між ЕРС та напругою на затискачах джерела енергії?
5. Як визначається сила струму в разі короткого замикання затискачів джерела енергії?
6. Сформулюйте перший та другий закони Кірхгофа.
7. Як визначається загальний опір при послідовному, паралельному та змішаному з'єднанні споживачів енергії?
8. Чому дорівнюють робота й потужність електричного струму та в яких одиницях вони вимірюються?
9. Сформулюйте закон Ленца — Джоуля.
10. Як розрахувати площу поперечного перерізу провідника?
11. Який опір називається нелінійним?

Розділ II. ХІМІЧНА ДІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

§ 14. ЕЛЕКТРОЛІЗ

Розчини солей і кислот у воді або в якомусь іншому розчиннику проводять електричний струм і називаються електролітами або провідниками другого роду на відміну від металевих провідників, що зветься провідниками першого роду.

Електричний струм може протікати через середовища з електрично зарядженими частками, які мають здатність переміщуватися.

У процесі розчинення солей і кислот у воді або в якомусь іншому розчиннику (етиловому спирті, бензині, бензолі тощо) певна кількість молекул розпадається на дві частини, що зветься іонами, причому одна частина має позитивний заряд, друга — негативний.

Отже, на відміну від металевих провідників, у яких електрику переносять електрони, в електролітах це роблять іони. Іони можуть бути простими й складними. Простий іон утворений одним атомом речовини. Іони, що складаються з кількох атомів, називаються складними.

Розпад хімічних сполук на іони під дією розчинника називається електролітичною дисоціацією і виражається звичайними хімічними рівняннями, у лівій частині яких розміщуються хімічні символи речовин, що розпадаються, а у правій — іони, утворені з цих речовин. Наприклад, рівняння дисоціації кухонної солі (хлористого натрію) записується так: $\text{NaCl} \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$. Для складніших сполук процес дисоціації може протікати в кілька стадій.

Якщо в посудину з електролітом занурити дві металеві пластини, що звуться електродами, які дотягнутими провідниками приєднані до джерела енергії постійного струму, то внаслідок різниці потенціалів між електродами через електроліт протікатиме струм. Пройдення струму через електроліт супроводжується хімічним процесом, що зветься електролізом. Іони, що знаходяться в електроліті, притягуючись до електродів, рухаються в протилежних напрямках: позитивні — до катода, негативні — до анода. Підійшовши до катода, позитивні іони одержують від нього електрони, яких їм не вистачає, і утворюють електрично нейтральні атоми. На аноді відбувається зворотний процес: негативні іони віддають йому свої надлишкові електрони. Наприклад, під час електролізу розчину кухонної солі на катоді відкладаються позитивні іони натрію, а на аноді — негативні іони хлору. Внаслідок безперервного переходу електронів з катода на іони та надходження їх на анод підтримується рух електронів у провідниках, які з'єднують джерело електричної енергії з електродами.

§ 15. ЗАКОНИ ФАРАДЕЯ

Під час проходження електричного струму через електроліт на електродах виділяються певні маси речовин, що містяться у вигляді хімічної сполуки в електроліті. Залежність маси речовини, що виділилася, від сили струму встановлюється двома законами Фарадея.

Перший закон Фарадея сформульовано так: *маса речовини, що виділилася на електродах під час проходження струму через електроліт, прямо пропорційна значенню електричного заряду, що пройшов через електроліт.* Якщо через електроліт проходить один кулон електричного заряду, то з електроліту виділяється певна маса речовини, яка називається електрохімічним еквівалентом даної речовини.

У практичних розрахунках для визначення електричного заряду зручніше користуватися не кулонами, а ампер-годинами ($A \cdot \text{год}$).

Оскільки один кулон дорівнює ампер-секунді, то між ампер-годиною та кулоном існує таке співвідношення: $1 A \cdot \text{год} = 60 \cdot 60 = 3600 A \cdot \text{с} = 3600 \text{ Кл}$.

Електрохімічний еквівалент K виражається в грамах, віднесених до однієї ампер-години електричного заряду ($\text{г}/A \cdot \text{год}$), тобто це маса речовини в грамах, що виділилася з електроліту під час проходження через нього однієї ампер-години електричного заряду.

Позначивши літерою I незмінну силу струму, що протікає через електроліт протягом певного часу t , і взявши до уваги електрохімічний еквівалент даної речовини K , визначимо масу даної речовини q , що виділилася за цей час: $q = KIt$. Наприклад, якщо внаслідок проходження через міднокислий електроліт струму силою $1 A$ протягом 1 год на катоді виділяється $1,186 \text{ г}$ міді, то при струмі силою $10 A$ із такого самого розчину за 10 год виділиться $1,186 \cdot 10 \cdot 10 = 118,6 \text{ г}$.

Другий закон Фарадея має таке формулювання: *при однакових електричних зарядах, що протікають через різні електроліти, маси речовин, які виділилися на електродах, прямо пропорційні їх хімічним еквівалентам.*

Атомна маса одновалентного елемента дорівнює його хімічному еквіваленту; хімічний еквівалент n -валентного елемента в n разів менший за його атомну масу, тобто $a = A/n$, де a — хімічний еквівалент речовини; A — атомна маса; n — валентність. Наприклад, атомна маса алюмінію $A = 27$, валентність $n = 3$, отже, його хімічний еквівалент $a = 27/3 = 9$.

Співставляючи перший і другий закони Фарадея, можна зробити висновок, що електрохімічні еквіваленти речовин прямо пропорційні їх хімічним еквівалентам, тобто $K_1/a_1 = K_2/a_2 = K_3/a_3 = \dots$. Відношення електрохімічних еквівалентів до хімічних є величиною сталою: $K/a = 3,72 \cdot 10^{-2} = 0,0372 = 1/26,8$. Отже, другий закон Фарадея можна виразити так: $K = a/26,8 = A/26,8n$.

Електроліз набув широкого застосування в різних галузях промисловості.

Вперше його використали для гальванопластики, яка являє собою одержання копій з рельєфів. Для цього гіпсовий відбиток (негатив) з рельєфа, який знімають, покривають шаром графіту і занурюють у розчин солі металу, який осідає на відбитку, як на катоді. На виїнятому з розчину гіпсі матимемо металеву копію рельєфа.

За допомогою електролізу наносять відносно тонкі покриття одних металів на інші (гальваностегія). Гальваностегія використовується для надання виробу декоративного вигляду та для захисту його від корозії. Таким способом виконують позолочення, сріблення, нікелювання та ін.

Електроліз служить також для очищення (рафінування) металів, наприклад міді. Пластини литої міді, одержаної шляхом випалювання руди, опускають як аноди в ванні з розчином мідного купоросу, підкисленого сірчаною кислотою для підвищення провідності електроліту. Катодами в цих ваннах служать тонкі мідні пластинки, на яких відкладається електролітична мідь, а домішки осідають на дні ванни.

Досить поширений електролітичний спосіб одержання таких лугів натрію, калію та хлору, а також кисню й водню розкладанням води, підкисленої сірчаною кислотою.

Явище електролізу небезпечно для ряду підземних споруд. Під дією електролізу блукаючими струмами може бути зруйнована броня кабелів, водопровідних і газових труб та інших металевих споруд. Головним джерелом цих струмів є електрообладнання транспорту — трамваїв і електрифікованих залізниць. Надзвичайно шкідливо діють блукаючі струми на підземні телефонні кабелі, які покриті незахищеною свинцевою оболонкою.

§ 16. ГАЛЬВАНІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ

Під час роботи гальванічних елементів в них відбувається рух іонів та осідання на електродах речовин, що виділяються з електроліту.

Найпростішим гальванічним елементом є мідно-цинковий. У скляну посудину, наповнену розчином сірчаної кислоти у воді, вміщено мідну й цинкову пластини, які являють собою позитивний і негативний полюси елемента. Якщо коло елемента замкнути будь-яким провідником, то всередині цього елемента протікатиме струм від цинкової негативної пластини до мідної позитивної, а в зовнішньому колі — від мідної до цинкової. Під дією струму позитивні іони водню всередині елемента рухаються в напрямку проходження струму, а негативні іони кислотного залишку — у протилежному напрямку. Стикаючись із мідною пластинкою, позитивні іони водню віддають їй свої заряди, а водень у вигляді газових бульбашок накопичується на її поверхні. У цей самий час негативні іони залишку сірчаної кислоти віддають свої заряди цинковій пластині. Так відбувається безперервне заряджання пластин елемента, яке підтримує різницю потенціалів (напругу) на його затискачах.

Виділення водню на мідній пластині елемента послаблює його дію — поляризує елемент. Явище поляризації полягає в тому, що накопичуваний на позитивному електроді водень разом з металом електрода створює додаткову різницю потенціалів, яка називається електрорушійною силою поляризації і спрямована проти електрорушійної сили елемента. Крім того, бульбашки водню, що вкривають частину мідної пластини, зменшують площу її діючої поверхні, а це збільшує внутрішній опір елемента.

Поляризація в розглянутому елементі настільки значна, що робить його непридатним для практичних цілей. Щоб уникнути явища поляризації, до складу елемента вводять поглинач, який називається деполяризатором і призначений для поглинання водню та перешкоджання накопиченню його на позитивному полюсі елемента. Деполяризаторами можуть бути хімічні препарати, збагачені киснем або хлором.

Електрорушійна сила гальванічного елемента залежить від хімічних і фізичних властивостей речовин, які є в його складі, і не залежить

ні від форми й розмірів елемента, ні від його внутрішньої будови. Але внутрішня будова й розміри окремих частин елемента мають великий вплив на його внутрішній опір, оскільки він залежить від відстані між полюсами (при зменшенні цієї відстані внутрішній опір елемента зменшується), від площі поверхні полюсів, зануреної в рідину (при збільшенні цієї площі внутрішній опір зменшується), та від хімічного складу рідини елемента. Внутрішній опір гальванічних елементів не є сталим і в міру роботи елемента він поступово зростає.

Залежно від способу деполяризації гальванічні елементи можна поділити на два типи: елементи, в яких деполяризатором є розчин якої-небудь солі (наприклад, мідно-цинкові), та елементи, в яких анод оточений перекисом марганцю (наприклад, вугільно-цинкові). Гальванічні елементи цих двох типів широко застосовуються в електротехніці.

Електрорушійна сила мідно-цинкового елемента становить 1,1 В, а внутрішній опір залежно від тривалості роботи — 5...10 Ом.

У вугільно-цинковому елементі позитивним полюсом служить вугільна пластинка, а негативним — цинковий стержень. Деполяризатором у цьому елементі є спресована під великим тиском суміш, що називається агломератом. Вона складається з перекису марганцю та графіту. Електролітом у вугільно-цинковому елементі служить водний розчин хлористого амонію. Електрорушійна сила цього елемента — 1,4...1,5 В на початку розряджання при середньому значенні 0,9...1,1 В, а внутрішній опір залежно від конструкції елемента — 0,25...0,7 Ом на початку розряджання та 1,4...5 Ом — у кінці.

Вугільно-цинкові елементи випускаються у вигляді так званих сухих елементів стаканчиккового та галетного типів, досить зручних для перенесення й перевезення.

У сухих елементах стаканчиккового типу (рис. 14) позитивний полюс 8 з агломератом 2 розміщують всередині цинкової коробки 9, яка служить негативним полюсом елемента. Простір між стінками цинкової коробки та агломератом заповнюють пастою 1, що складається з розчину хлористого амонію та картопляного борошна. Над агломератом укладають картонну прокладку 3, а на неї насипають шар тирси 4, яку закривають прокладкою 5. Потім елемент заливують смолою 7, в яку вставляють трубку 6. Призначення цієї трубки — виведення утворених всередині елемента газів.

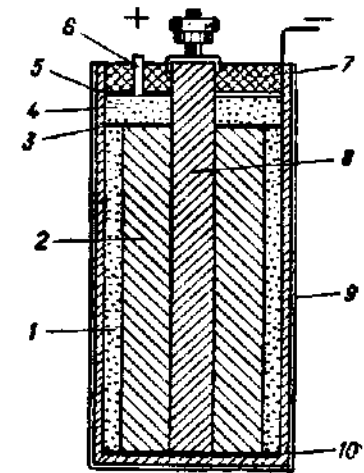


Рис. 14. Сухий гальванічний елемент.

На вугільний електрод, що виходить із смоли, насаджують мідний жовпачок із гвинтом та гайкою для приєднання провідника. До верхньої частини цинкової коробки (негативного полюса) припаюють ізольований гнучкий провід. На дно коробки укладають ізолюючу прокладку 10.

У галетному елементі негативним електродом є цинкова пластина, позитивним — спресований у вигляді галети порошок діоксиду марганцю з вугіллям. Між електродами розміщують картонну пластинку, насичену розчином нашатирного спирту. Зовнішня поверхня цинкової пластини вкрита шаром каніфолі з частками графіту для електропровідності. Ізоляцією служать хлорвінілові плівки. Галетні елементи компактні, і їх активні матеріали (вугілля й особливо цинк) використовуються краще, ніж у стаканчикових елементах.

§ 17. АКУМУЛЯТОРИ

Акумулятором називається пристрій, що має здатність накопичувати й зберігати протягом певного часу електричну енергію.

В акумуляторі, як і в гальванічному елементі, електричний струм є наслідком хімічних процесів. Але на відміну від акумулятора у гальванічному елементі одержувані хімічні сполуки не можуть бути повторно розкладені й приведені у початковий стан струмом стороннього джерела. Тому гальванічні елементи називаються первинними, а акумулятори — вторинними, або оборотними. Повторні зарядження й розрядження не тільки не шкодять акумуляторові, але навіть поліпшують його властивості, оскільки в роботі беруть участь усе глибші шари електродних пластин.

Залежно від складу електроліту й матеріалу пластин акумулятори можуть бути кислотними й лужними.

Найпростіший кислотний акумулятор складається з двох свинцевих пластин (електродів), занурених в електроліт, яким служить вода з невеликою домішкою сірчаної кислоти. Постійний струм стороннього джерела, проходячи через електроліт, розкладає його на складові частини. Всередині електроліту виникає рух позитивних іонів водню до пластини, з'єднаної з негативним затискачем джерела струму, та негативних іонів кисню — до пластини, з'єднаної з позитивним затискачем. Внаслідок електролізу окислюється свинець на позитивному електроді й утворюється губчастий свинець на негативному. Так електрична енергія перетворюється в хімічну й акумулятор стає зарядженим. Хімічна енергія певний час може зберігатися й у разі потреби легко переходити в електричну.

Якщо акумулятор від'єднати від джерела струму й замкнути на будь-який приймач енергії, то він сам стане джерелом струму аналогічно гальванічному елементові, у якого електродами служать пластини, що відрізняються одна від одної хімічним складом.

Електролітом у кислотних акумуляторах служить розчин сірчаної кислоти певної густини. Густиною розчину називається цифра, що показує, у скільки разів маса цього розчину більша від маси води такого ж об'єму.

Для стаціонарних акумуляторів застосовують розчин сірчаної кислоти густиною 1,21 при 15 °С, для переносних — густиною 1,26.

Густина електроліту визначають ареометром, який являє собою вапаяну з обох кінців скляну трубку, всередині якої є шкала з поділками. У нижній розширеній частині ареометра знаходиться ртуть або дріб, через що трубка плаває вертикально. Ареометр опускають у посудину з електролітом. Чим більша густина електроліту, тим вище піднімається ареометр із рідини. Поділка ареометра, що збігається з рівнем розчину, показує густина електроліту.

Готуючи розчин для акумуляторів, сірчану кислоту тонким струменем вливають у воду. Не можна вливати воду в сірчану кислоту, бо відбудеться бурхливе розбризкування кислоти, яке призведе до опіків. Вода для електроліту має бути дистильованою.

Внутрішній опір акумуляторів дуже малий порівняно з внутрішнім опором гальванічних елементів. Це дає змогу вважати, що напруга на затискачах акумуляторної батареї приблизно дорівнює її ЕРС. Проте внутрішній опір не є величиною сталою. Він обумовлюється складом пластин, відстанню між ними, густиною й температурою електроліту, ступенем зарядженості акумулятора. Так, опір розрядженого акумулятора приблизно в півтора-два рази більший, ніж зарядженого.

Електрорушійна сила акумулятора залежить від густини електроліту і не залежить від його розмірів та номінальної ємності. При густині електроліту $d = 1,1 \dots 1,35$ ЕРС акумулятора $E = 0,85 + d$.

Під час зарядження й розрядження акумулятора густина електроліту не залишається сталою, у зв'язку з чим змінюються його ЕРС і напруга на затискачах (рис. 15).

У процесі зарядження акумулятора збільшується густина електроліту, внаслідок чого напруга на затискачах підвищується (крива 1). У процесі розрядження кислотного акумулятора напруга на його затискачах швидко спадає до 1,85...1,8 В і після цього швидко знижується до нуля (крива 2). Зниження напруги в процесі розрядження акумулятора пояснюється тим, що при цьому густина його електроліту зменшується. Коли напруга на акумуляторі досягає 1,8 В (за короткочасного розрядження — 1,75 В), то вся запасена в ньому енергія втрачена (на обох пластинах утворюється сульфат свинцю, який є поганим провідником струму). Подальше розрядження призводить до того, що напруга швидко знижується до нуля. Якщо акумулятор від'єднати від навантаження, його напруга знову зростає приблизно до 2 В, оскільки електроліт проходить вглибину пластин у пори активної маси. Проте, якщо ввімкнути такий акумулятор знову на навантаження, напруга на його затискачах знову швидко зменшиться до нуля.

На практиці розрядження доводять лише до 1,8 В, оскільки в разі розрядження нижче 1,8 В акумулятор робиться непридатним — пластини його частково покриваються білим нальотом крупнокристалічного сульфату свинцю, який являє собою настільки поганий провідник, що зарядження акумулятора до мінімальної ємності стає неможливим. Це явище називається сульфатацією пластин акумулятора.

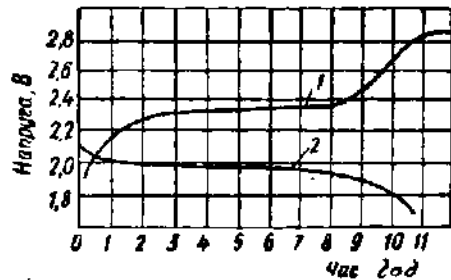


Рис. 15. Графік зміни напруги кислотного акумулятора:
1 — у процесі зарядження; 2 — у процесі розрядження.

Кількість електрики, яку акумулятор може віддати в процесі розрядження певною силою струму до низької допустимої напруги, називається його є м н і с т ю. Вона дорівнює добутковій силі розрядного струму в амперах на тривалість розрядження в годинах і виражається в ампер-годинах. Ємність акумулятора залежить від активної маси, сили розрядного струму й температури. Під н о м і н а л ь н о ю є м н і с т ю розуміють ту кількість електрики, яку віддає повністю розряджений акумулятор за 10-годинного режиму розрядження і температури 25 °С. Отже, акумулятор віддає номінальну ємність, розряджаючись протягом 10 год силою струму, що становить 0,1 його номінальної ємності. Зі збільшенням сили розрядного струму ємність акумулятора зменшується, через те що поверхня пластин покривається сульфатом свинцю й утруднює доступ електроліту до внутрішніх шарів активної маси. Зі зниженням температури збільшується в'язкість електроліту, що також утруднює його доступ до внутрішніх шарів активної маси та зменшує ємність акумулятора.

У вимкненому стані заряджений акумулятор втрачає частину запасеної ним ємності. Це явище називається с а м о р о з р я д ж а н н я м. Саморозрядження акумулятора підсилюється з підвищенням температури й густини електроліту.

Щоб збільшити ємність акумулятора, з'єднують паралельно кілька однойменних пластин (рис. 16). Кожна група позитивних і негативних

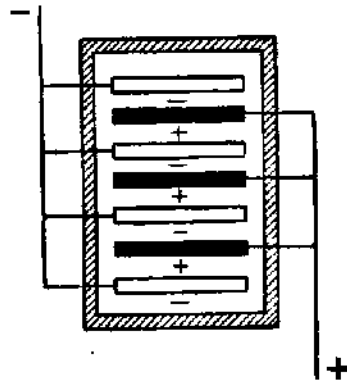


Рис. 16. Схема з'єднання пластин кислотного акумулятора.

пластин працює як одна велика пластина, площа якої дорівнює сумі їхніх площ. Оскільки позитивні пластини мають знаходитися між негативними, негативних пластин завжди на одну більше, ніж позитивних. За цієї умови обидва боки позитивної пластини вступають у взаємодію з електролітом (якщо робота одnobічна, позитивні пластини жодляються, і під час зіткнення їх з негативними може статися коротке замикання).

Стационарні кислотні акумулятори виготовляють у скляній або керамічній посудині. У акумуляторів великої ємності така посудина дерев'яна. Всередині вона викладена свинцем або кислотостійким ізоляційним матеріалом. Кислотні акумулятори застосовують в електротехнічних установках стаціонарного типу та на автотранспорті.

Переносними акумуляторами є переважно лужні. Посудину лужного акумулятора зварюють із тонкої листової сталі і з зовнішнього боку нікелюють. У центрі кришки передбачено отвір для заливання в акумулятор електроліту.

Електроуршійна сила лужних акумуляторів залежить від стану активної маси пластин. Від температури та густини електроліту ЕРС залежить незначною мірою і лише за низьких температур, що наближаються до нуля, вона різко зменшується. Напруга в кінці зарядження акумулятора становить 1,8 В, по закінченні зарядження — 1,5... 1,55 В; ЕРС розрядженого акумулятора — 1,3 В.

Внутрішній опір лужного акумулятора набагато більший від внутрішнього опору кислотного.

Перевагою лужних акумуляторів є те, що вони не потребують старанного догляду, не бояться струсів, можуть тривалий час залишатися в розрядженому стані, переносять короткі замикання, які для кислотних акумуляторів є надто небезпечними. Ступінь саморозрядження у лужних акумуляторів менший, ніж у кислотних.

Роботу акумулятора характеризують його видатність за ємністю і видатність за енергією.

Кількість електрики Q , яку акумулятор одержав під час зарядження, називається є м н і с т ю акумулятора при заряджанні: $Q = I_3 T$, де I_3 — сила струму під час зарядження, A ; T — тривалість зарядження, год.

Кількість електрики q , яку акумулятор віддав під час розрядження, називається є м н і с т ю акумулятора при розряджанні. Якщо позначити силу розрядного струму I_p , а тривалість розрядження — t , то ємність акумулятора при розряджанні $q = I_p t$.

Відношення ємності при розряджанні до ємності при заряджанні називається видатністю акумулятора за ємністю або за кількістю електрики:

$$\eta_1 = q/Q = I_p T / (I_3 T).$$

Середнє значення η_1 для кислотних акумуляторів — 0,85, для лужних — 0,65.

Якщо позначити середню напругу акумулятора під час його заряджання U_2 і тривалість заряджання T , то при силі зарядного струму I_2 електрична енергія, або робота, витрачена на заряджання акумулятора ($Вт \cdot год$), $A_1 = U_p I_p t$.

Відповідно електрична енергія, одержана від розряджання акумулятора при середній напрузі U_p і силі розрядного струму I_p протягом часу t , становить $A_2 = U_p I_p t$.

Відношення енергії, одержаної від акумулятора під час його розряджання, до енергії, витраченої на його заряджання, називається **вдатністю акумулятора за енергією**

$$\eta_2 = A_2/A_1 = U_p I_p t / (U_2 I_2 T).$$

Середнє значення η_2 для кислотних акумуляторів — 0,65, для лужних — 0,45.

Залежно від матеріалу електродів лужні акумулятори бувають кадмієво-нікелеві, залізонікелеві, срібно-цинкові, золотоцинкові та газові. Масове застосування золотоцинкових акумуляторів обмежується їх високою вартістю. Газові акумулятори відзначаються легкістю й дешевизною, але технологія їх виробництва недостатньо розроблена.

Найбільш поширені кадмієво-нікелеві та залізонікелеві акумулятори. Електролітом для них служить розчин їдкого калію у воді, густина електроліту — 1,2. За своєю будовою й електричними даними акумулятори цих типів не дуже відрізняються один від одного. Активну масу запресовують у брикети (пакети), а потім із брикетів складають окремі пластини. У залізонікелевих акумуляторів негативних пластин на одну більше, ніж позитивних. У кадмієво-нікелевих акумуляторів позитивних пластин на одну більше, ніж негативних. Один полюс акумулятора з'єднується з посудиною (у залізонікелевих — негативний, у кадмієво-нікелевих — позитивний).

У кадмієво-нікелевих акумуляторів активна маса позитивних пластин складається з гідрату оксиду нікелю, який для кращої провідності перемішують з графітом. Активна маса негативних пластин являє собою гідрат оксиду кадмію та заліза.

У залізонікелевих акумуляторів активною масою позитивних пластин є гідрат закису нікелю, змішаний з графітом, а негативних пластин — спеціально приготований залізний порошок.

Завдяки високим експлуатаційним показникам почали широко застосовуватись срібно-цинкові акумулятори. Такий акумулятор являє собою пластмасову посудину, в якій розміщені позитивні й негативні електроди, зібрані з окремих пластин. Негативні електроди, що виготовлені з пластин оксиду цинку, поміщені в захисні пакети

в матеріалі, який добре пропускає електроліт, але затримує металеві частки. Позитивні пластини виготовлені зі срібла.

Електролітом срібно-цинкових акумуляторів служить водний розчин їдкого калію. Для нормальної роботи акумулятора потрібна невелика кількість електроліту: це дає змогу використовувати акумулятор напівсухим і експлуатувати його в будь-якому положенні (вертикально й горизонтально). Трубка, якою закривається посудина, водонепроникна і відкривається лише під час заряджання. У процесі заряджання акумулятор має перебувати у вертикальному положенні. ЕРС повністю зарядженого акумулятора становить 1,82...1,86 В, напруга під час розряджання — приблизно 1,5 В.

Перевагами срібно-цинкових акумуляторів є невеликий внутрішній опір і мала маса. Срібно-цинкові акумулятори працюють при температурі до -59°C , тобто до замерзання електроліту. Верхня межа температури $+80^\circ\text{C}$. Вони переносять відносно великі перепади тиску навколишнього середовища.

Щоб зібрати акумуляторну батарею або батарею гальванічних елементів, кілька елементів з'єднують послідовно, тобто катод першого акумулятора з'єднують з анодом другого, катод другого — з анодом третього і т. д. Одержані таким чином вільні електроди (анод першого елемента і катод останнього) — це відповідно позитивний і негативний полюси акумуляторної батареї. Якщо батарея складається з n акумуляторів чи гальванічних елементів з ЕРС одного елемента E_0 і внутрішнім опором R_0 , ЕРС батареї $E = nE_0$, а внутрішній опір $R = nR_0$.

Послідовне з'єднання елементів використовується для збільшення напруги. Щоб одержати за невеликої напруги силу струму, що перевищує допустиму силу струму одного акумулятора чи елемента, застосовують кілька паралельно з'єднаних акумуляторів або елементів. Для цього позитивні й негативні полюси всіх елементів з'єднують між собою окремо й одержані загальні позитивний і негативний полюси є полюсами батареї. Якщо батарея зібрана з m паралельно з'єднаних елементів, то її ЕРС $E = E_0$, а внутрішній опір $R = R_0/m$. Якщо n — кількість груп чи елементів у групі, з'єднаних послідовно, а m — кількість груп чи елементів у групі, з'єднаних паралельно, то ЕРС батареї $E = nE_0$, а її внутрішній опір $R = nR_0/m$.

Контрольні запитання

1. У чому полягає процес електролізу?
2. Як сформульовано перший закон Фарадея?
3. Як сформульовано другий закон Фарадея?
4. Поясніть будову вугільно-цинкового елемента.
5. Поясніть будову й принцип роботи кислотного акумулятора.

§ 18. МАГНІТИ І ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

Магнетизм — це особливий прояв руху електричних зарядів всередині атомів і молекул, який полягає в тому, що деякі тіла здатні притягувати до себе й утримувати частки заліза, нікелю та інших металів. Ці тіла називаються магнітними.

Стрілка компаса, яка є магнітом, установлюється в магнітному полі Землі так, що один її кінець показує напрям на північ і називається північним полюсом (N), а протилежний кінець — південним полюсом (S). Залежно від призначення магнітам надають різної форми: прямокутної, ромбічної, круглої тощо. Магніт будь-якої форми має два полюси — північний і південний.

Якщо намагнічений стержень зашурити в залізні ошурки і потім вийняти, то найбільше ошурок буде притягнуто до кінців магніту, а в його середній частині, що називається нейтральною, їх не буде. З намагніченого стержня, поділеного на дві частини, утворюються два магніти з двома різноименними полюсами на кінцях. Якщо стержень і далі дробити на частини, то одержуватимемо окремі магніти з північним і південним полюсами на кінцях. Отже, одержати магніт в яким-небудь одним полюсом (N або S) неможливо.

Якщо недалеко від північного N (або південного S) полюса якогось магніту помістити сталевий брусок, то він набуде властивості притягувати залізні предмети, причому ближчий до магнітного полюса кінець бруска буде південним полюсом S , а протилежний — північним N . Між полюсами двох магнітів, розташованих на певній відстані один від одного, виникає сила взаємодії, спрямована так, що однойменні полюси взаємно відштовхуються, а різноименні — притягуються.

Навколо будь-якого намагніченого тіла виникає магнітне поле, яке є матеріальним середовищем, де виявляється дія магнітних сил.

Магнітне поле зображують у вигляді магнітних ліній, спрямованих від північного полюса до південного (рис. 17).

Будь-яка магнітна лінія не має ні початку, ні кінця і являє собою замкнену криву, оскільки північний і південний полюси магніту певіддільні один від одного.

Будь-яке внесення в магнітне поле тіло пронизується магнітними лініями і певним чином впливає на поле. При цьому різні матеріали по-різному діють на магнітне поле. У намагнічених тілах

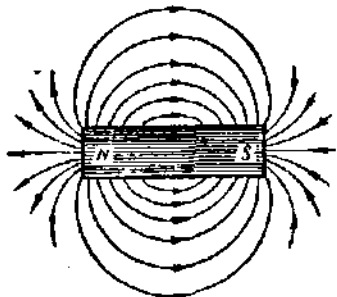


Рис. 17. Магнітне поле постійного магніту.

магнітне поле утворюється від руху електронів, що обертаються навколо ядра атома й навколо власної осі. Орбіти та осі обертання електронів в атомах можуть перебувати в різних положеннях один відносно іншого, отже, й магнітні поля, що породжуються рухомими електронами, теж знаходяться в різних положеннях. Залежно від взаємного розташування магнітні поля можуть додаватися або відніматися. У першому випадку атом матиме магнітне поле або магнітний момент, у другому — не матиме. Матеріали, атоми яких не мають магнітного моменту і намагнітити які неможливо, називаються діамagnetними. До них належить абсолютна більшість речовин, що зустрічаються в природі, та деякі метали (мідь, свинець, цинк, срібло тощо).

Матеріали, атоми яких мають магнітний момент і можуть намагнічуватися, називаються парамагнітними. До них належать алюміній, олово, марганець та ін. Виняток становлять феромагнітні матеріали, атоми яких мають великий магнітний момент і які легко піддаються намагнічуванню. До таких матеріалів належать залізо, сталь, чавун, нікель, кобальт, гадоліній та їхні сплави.

§ 19. МАГНІТНЕ ПОЛЕ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Навколо провідника зі струмом утворюється магнітне поле, і розміщена поблизу провідника магнітна стрілка, яка вільно обертається, прагнучиме зайняти положення, перпендикулярне до площини, що проходить вздовж провідника. У цьому легко переконатися, провівши такий досвід. В отвір у горизонтально розміщеному листі картону вставляють прямолінійний провідник і пропускають по ньому струм. На картон насипають залізні ошурки й переконуються в тому, що вони розташовуються концентричними колами зі спільним центром у точці перетину провідником картонного листа (рис. 18, а). Магнітна стрілка, підвішена на нитці поряд з провідником, займе положення, показане на рис. 18, а. Зі зміною напрямку струму у провіднику, магнітна стрілка повернеться на кут 180° , залишаючись у положенні, перпендикулярному до площини, що проходить вздовж провідника. Залежно від напрямку струму у провіднику напрямок магнітних ліній утвореного ним магнітного поля визначається правилом свердлика, яке формулюється так: якщо поступальний рух свердлика збігається з напрямком струму у провіднику, то обертальний рух його ручки показує напрямок магнітних ліній поля, що утворюється навколо цього провідника.

Якщо по дроту, зігнутому у вигляді кільця, пропустити струм, то під дією його також виникає магнітне поле. Зігнутий спіралью дріт, що складається з кількох витків, розташованих так, що їхні осі збігаються (рис. 18, б), називається соленоїдом. Під час проходження струму через обмотку соленоїда або через один виток дроту

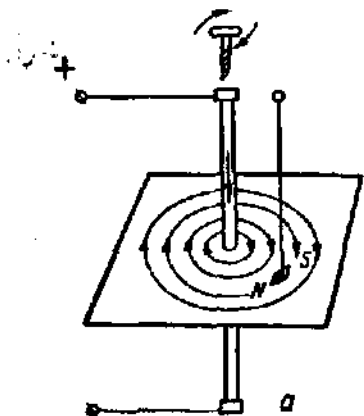
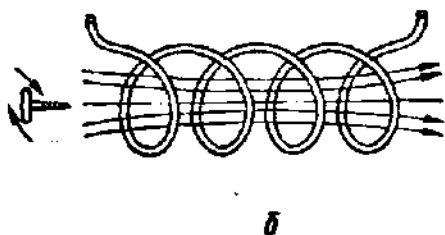


Рис. 18. Магнітне поле:
а — прямого провідника зі струмом; б — соленоїда.



вбуджується магнітне поле, напрямком якого також визначається правилом свердлика. Якщо розмістити вісь свердлика перпендикулярно до площини кільцевого провідника або вздовж осі соленоїда й обернути ручку свердлика за напрямком струму, то поступальний рух свердлика покаже напрямок магнітних ліній поля соленоїдного кільця.

Магнітне поле, викликане струмом соленоїдної обмотки аналогічне магнітному полю постійного магніта, тобто кінець соленоїда, з якого виходять магнітні лінії, є його північним полюсом, а протилежний кінець — південним. Напрямок магнітного поля залежить від напрямку струму і в разі зміни напрямку струму в прямолінійному провіднику або в котушці зміниться також напрямок магнітних ліній поля, яке збуджується цим струмом. Однорідне магнітне поле в усіх точках має однаковий напрямок і однакову інтенсивність. В іншому випадку поле називається неоднорідним. Однорідне магнітне поле графічно зображають паралельними лініями однакової густини, наприклад у повітряному зазорі між двома різнойменними паралельно розміщеними полюсами магніту.

§ 20. ПРОВОДНИК ЗІ СТРУМОМ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ. МАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

Якщо провідник, по якому протікає електричний струм, внести в магнітне поле магніту, то внаслідок взаємодії магнітного поля та провідника зі струмом провідник буде переміщуватись у той чи той бік. Напрямок переміщення провідника залежить від напрямку струму в ньому і від напрямку магнітних ліній поля.

Припустимо, що в магнітному полі магніту $N - S$ (рис. 19, а) знаходиться провідник, розміщений перпендикулярно до площини рисунка: по провіднику протікає струм у напрямку від нас за площину

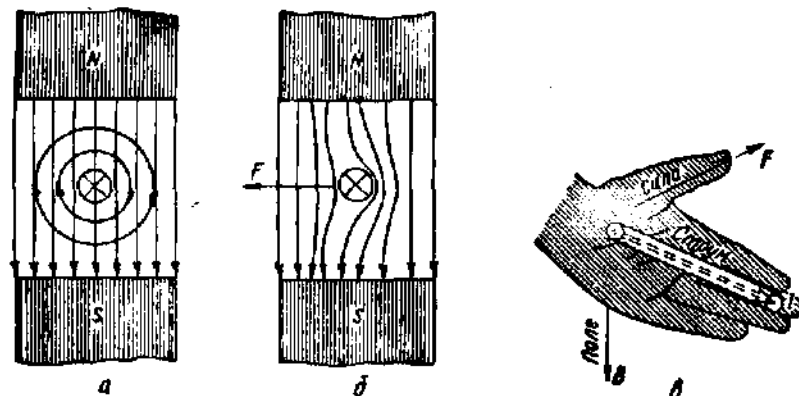


Рис. 19. Рух провідника зі струмом у магнітному полі та правило лівої руки:

а — магнітні поля полюсів і струму провідника; б — результуюче магнітне поле; в — правило лівої руки.

рисунка. Струм, що йде від площини рисунка до спостерігача, позначається умовно точкою, а струм, що направляється за площину рисунка від спостерігача, — хрестом. Від дії струму навколо провідника утворюється своє магнітне поле. Застосувавши правило свердлика, легко перекопатися, що в розглядуваному випадку напрямок магнітних ліній цього поля збігається з напрямком руху годинникової стрілки. Від взаємодії магнітного поля магніту і поля, утвореного струмом, утворюється результуюче магнітне поле (рис. 19, б). Густина магнітних ліній результуючого поля з обох бсків провідника різна. Справа від нього магнітні поля, маючи однаковий напрямок, додаються, а зліва спрямовані зустрічно поля частково взаємно знищуються. Отже, на провідник діятиме сила, яка буде більшою справа і меншою зліва. Під дією більшої сили провідник переміщуватиметься в напрямку сили F . Зміна напрямку струму в провіднику обумовить зміну напрямку магнітних ліній навколо нього, внаслідок чого зміниться і напрямок переміщення провідника.

Для визначення напрямку руху провідника в магнітному полі можна скористатися правилом лівої руки, яке формулюється так: якщо ліву руку розмістити так, щоб магнітні лінії пронизували долоню, а витягнуті чотири пальці показували напрямок струму в провіднику, то відігнутий великий палець покаже напрямок руху провідника (рис. 19, в).

Сила, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі, залежить від сили струму у провіднику та інтенсивності магнітного поля. Інтенсивність магнітного поля характеризується магнітною індукцією B . Одиниця вимірювання магнітної індукції — тесла ($Tл = В \cdot с \cdot м^{-2}$).

Про магнітну індукцію можна судити за силою дії магнітного поля на провідник зі струмом, що розміщений у цьому полі. Якщо на провідник довжиною l м зі струмом силою I А, розміщений перпендикулярно до магнітних ліній у рівномірному магнітному полі, діє сила IH (ньютон), то магнітна індукція такого поля становить 1 Тл. Магнітна індукція є величиною векторною, її напрямок збігається з напрямком магнітних ліній, причому в кожній точці поля вектор магнітної індукції спрямований по дотичній до магнітної лінії. Сила F , що діє на провідник зі струмом у магнітному полі, прямо пропорційна магнітній індукції B , силі струму в провіднику I та довжині провідника l : $F = BIl$. Ця формула справедлива лише в тому випадку, коли провідник зі струмом розміщений перпендикулярно до магнітних ліній рівномірного магнітного поля. Якщо провідник зі струмом знаходиться в магнітному полі під якимсь кутом α відносно магнітних ліній, то сила, що діє на провідник,

$$F = BIl \sin \alpha.$$

Якщо провідник буде розміщений вздовж магнітних ліній, то сила F дорівнюватиме нулеві, оскільки $\alpha = 0$.

§ 21. НАПРУЖЕНІСТЬ МАГНІТНОГО ПОЛЯ. ЗАКОН ПОВНОГО СТРУМУ

Властивість струму збуджувати магнітне поле характеризується магніторушійною силою, яку позначають літерою F . Магніторушійна сила розподіляється вздовж замкненої магнітної лінії. Вона дорівнює силі струму, що утворює магнітне поле, й вимірюється в амперах, як і сила струму. Магніторушійна сила прямолінійного провідника зі струмом дорівнює силі цього струму: $F = I$. Щоб утворити сильніше поле, струм пропускають по котушці з кількістю витків w , і оскільки кожен виток котушки має магніторушійну силу I , то МРС котушки $F = wI$.

Магніторушійна сила, що припадає на одиницю довжини магнітної лінії, називається напруженістю магнітного поля, позначається літерою $H = F/l$ (де l — довжина магнітної лінії) і вимірюється в амперах на метр (А/м) або частіше в одиницях, у 100 разів більших: А/см = 100 А/м.

Напруженість магнітного поля, як і магнітна індукція, є векторною величиною. В ізотропному середовищі (з однаковими магнітними властивостями в усіх напрямках) вектор напруженості магнітного поля збігається з напрямком магнітної лінії в даній точці.

Якщо фізичні умови вздовж усієї магнітної лінії однакові, то напруженість поля визначити дуже просто. Зокрема, навколо прямолінійного провідника лінії магнітного поля являють собою геометричні кола (див. рис. 18, а) кожне довжиною $l = 2\pi x$, де x — радіус кола з центром на осі провідника, проведений через розглядувану точку

поля. Умови в усіх точках вибраного кола однакові, і напруженість поля $H = I/2\pi x$, тобто з віддаленням від провідника напруженість поля зменшується. Це можна записати у вигляді $I = Hl = H \cdot 2\pi x$.

Якби магнітне поле було утворене не одним, а w провідниками зі струмом силою I , то магніторушійна сила

$$\Sigma I = Iw = wI = Hl = H \cdot 2\pi x.$$

Отже, намагнічувальна сила вздовж контура дорівнює силі повного струму, який пронизує поверхню, обмежену цим контуром. Одержане співвідношення називається законом повного струму.

Якщо найпростіший контур довжиною $l = 2\pi x$ пронизується n провідниками зі струмом силою I_1 одного напрямку та m провідниками зі струмом силою I_2 протилежного напрямку, то закон повного струму матиме такий вигляд: $F = nI_1 - mI_2 = Hl = H \cdot 2\pi x$.

У більшості електротехнічних пристроїв напруженість магнітного поля вздовж магнітної лінії змінюється залежно від матеріалу та площі перерізу ділянок, через які воно проходить. У цьому випадку магнітна лінія поділяється на k ділянок: в межах кожної ділянки напруженість магнітного поля можна вважати сталою. Якщо магнітне поле збуджується струмом силою I , що протікає по котушці з кількістю витків w , то закон повного струму для таких пристроїв виражатиметься загальною формулою

$$\Sigma I = wI = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_k l_k,$$

тобто магніторушійна сила дорівнює сумі добутків напруженості поля на довжину відповідних ділянок магнітного кола. Закон повного струму у наведеній загальній формі широко використовується для розрахунку магнітних полів електричних машин та апаратів.

§ 22. МАГНІТНА ПРОНИКНІСТЬ. МАГНІТНИЙ ПОТІК

Напруженість магнітного поля залежить не тільки від сили струму, що утворює його, але й від середовища, в якому це поле існує. Провідник зі струмом утворює магнітне поле напруженістю H , яка за незмінної сили струму буде також незмінна. Якщо цей провідник помістити в сталеву трубу, то при тій же силі струму в провіднику магнітне поле підсилиться в багато разів під дією молекулярних струмів сталі, тобто внаслідок зміни стану середовища.

Магнітна індукція, як і напруженість магнітного поля, — векторна величина, причому в переважній більшості випадків вектори магнітної індукції та напруженості мають однаковий напрямок. Між магнітною індукцією та напруженістю поля існує пряма пропорційна залежність, тобто $B = \mu H$, де μ — абсолютна магнітна проникність.

Абсолютна магнітна проникність, що дорівнює відношенню магнітної індукції до напруженості магнітного поля, вимірюється в генрі на метр [$\text{Гн/м} = \text{В} \cdot \text{с}/(\text{А} \cdot \text{м})$] і для вакууму становить $4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$. Це значення називається магнітною сталою μ_0 .

Число, що показує, у скільки разів абсолютна магнітна проникність μ даного середовища більша від магнітної сталої μ_0 , називається відносною магнітною проникністю або скорочено магнітною проникністю: $\mu = \mu_r/\mu_0$. Для повітря магнітна проникність беруть $\mu = 1$, як і для всіх тіл, крім феромагнітних. Що стосується феромагнітних тіл, то для них магнітна проникність значно більша від одиниці і для одного й того самого матеріалу не має сталого значення, а залежить від магнітного стану цього матеріалу, тобто від магнітної індукції феромагнітного тіла, яке підлягає намагнічуванню.

Магнітні властивості феромагнітних матеріалів характеризуються залежністю між B і H , зображеною графічно у вигляді кривої, що називається кривою намагнічування. Щоб одержати криву намагнічування якого-небудь матеріалу, будують графік, на горизонтальній осі якого відкладають напруженість поля, а на вертикальній — магнітну індукцію випробуваного матеріалу. Добуток магнітної індукції на площу будь-якої поверхні у магнітному полі, розміщеної перпендикулярно до напрямку магнітних ліній, називається магнітним потоком, який пронизує цю поверхню. Отже, магнітний потік $\Phi = BS$, де S — площа поверхні, що пронизується магнітним потоком.

Якщо магнітна індукція B виражена у теслах, а площа поверхні S — у квадратних метрах, то магнітний потік вимірюватиметься у веберах (Вб), тобто $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$. Вебер — це магнітний потік, при зменшенні якого до нуля за одну секунду в контурі, зв'язаному з цим потоком, індуктується ЕРС, що дорівнює одному вольту: $\text{Вб} = \text{В} \cdot \text{с}$.

§ 22. ВЗАЄМОДІЯ ПРОВІДНИКІВ ЗІ СТРУМАМИ

Якщо два або декілька провідників, через які протікають електричні струми, розмістити паралельно, то ці провідники, залежно від напрямку струму в них, будуть взаємно притягуватись або відштовхуватись. Така взаємодія провідників відбувається внаслідок виникнення магнітного поля навколо кожного з провідників.

Уявімо два провідники ab та $аг$ (рис. 20, a), через які протікають струми протилежних напрямків. Навколо провідників маємо магнітні поля. Згідно з правилом свердлика магнітні лінії цих полів спрямовані так, як показано в нижній частині рисунка. Якщо дивитися вздовж провідників згори, то навколо провідника ab магнітні лінії будуть спрямовані за годинниковою стрілкою, а навколо провідника

$аг$ — проти годинникової стрілки. Отже, ці лінії у просторі між провідниками матимуть однакові напрямки і провідники взаємно відштовхуватимуться, так само як і однойменні полюси магнітів. Якщо через провідники пропустити струми однакових напрямків (рис. 20, b), то лінії магнітних полів, що виникають навколо провідників, у просторі між провідниками будуть спрямовані у протилежні боки, тому провідники будуть взаємно притягуватись.

Сила взаємодії провідників, через які протікають струми, прямо пропорційна добутковій сил цих струмів I_1 та I_2 на абсолютну магнітну проникність μ , та на довжину l (довжину зближення), протягом якої провідники проходять паралельно, й обернено пропорційна відстані між провідниками a , тобто $F = \mu_0 I_1 I_2 l / a$. Якщо провідники перебувають у немагнітному середовищі, тобто коли $\mu_r = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ В} \cdot \text{с}/(\text{А} \cdot \text{м})$, то сила взаємодії провідників у ньютонках (Н)

$$F = (2I_1 I_2 l / a) \cdot 10^{-7}.$$

§ 24. ГІСТЕРЕЗИС

Початкова крива намагнічування визначає співвідношення між магнітною індукцією та напруженістю (B і H) лише для феромагнітного матеріалу, який не зазнає намагнічування. Соленоїд, у якому є залізне осердя, називається електромагнітом.

Якщо електричне коло (рис. 21, a), що складається із джерела B (наприклад, акумуляторної батареї), перемикача Π на два положення (1—2 та 3—4), реостата P і електромагніту E , розімкнене, то струму в обмотці електромагніту E немає. Установимо перемикач Π на контакти 1—2 і введемо повністю опір реостата. У колі з'явиться невеликої сили струм, який протікатиме в такому напрямку: плюс батареї B — контакт 1 — реостат P — обмотка електромагніту E — контакт 2 — мінус батареї B .

Відповідно до сили цього струму в електромагніті виникає магнітне поле з певною напруженістю H , та магнітною індукцією B . Застосувавши правило свердлика, знайдемо, що магнітний потік в осерді електромагніту спрямований справа наліво, тобто лівий кінець осердя є північним, а правий — південним полюсом електромагніту E . Відкладемо на горизонтальній осі (рис. 21, b) у масштабі напруженість поля H , а на вертикальній — індукцію B . Установивши перпен-

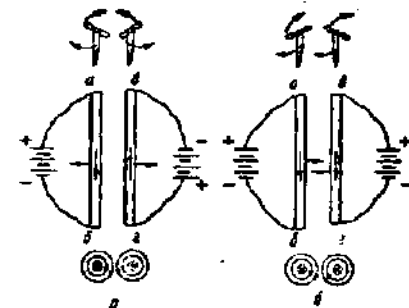


Рис. 20. Взаємодія провідників зі струмами:

a — різних напрямків; b — однакових напрямків.

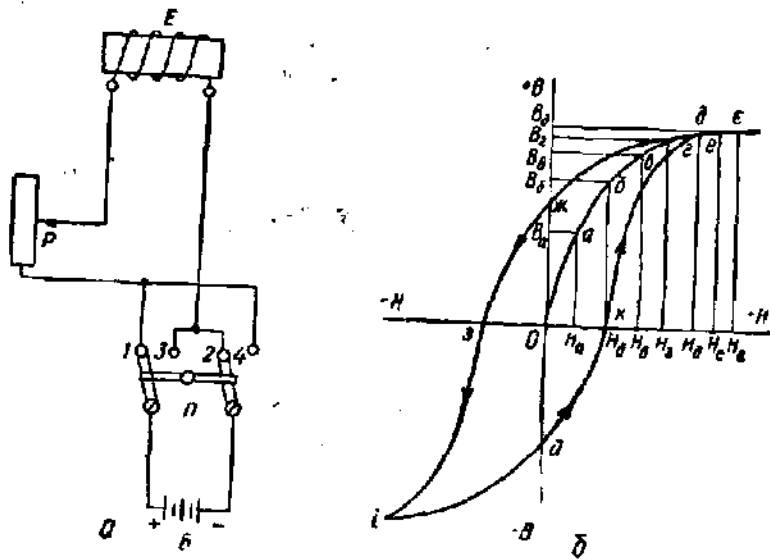


Рис. 21. Схема намагнічування сталевго осердя (а) та петля гістерезису (б).

дикулярні з точок відкладених значень H_a і B_a на горизонтальній і вертикальній осях, матимемо точку перетину a , яка буде першою точкою кривої початкового намагнічування осердя електромагніту.

Пересуваючи повзунок реостата P донизу, зменшуватимемо його опір. Внаслідок цього збільшаться сила струму в обмотці електромагніту і напруженість магнітного поля. Знайшовши зазначеним вище способом точки b , c , d і з'єднавши їх між собою, матимемо криву початкового намагнічування осердя. Ця крива показує, що магнітна індукція на початку намагнічування збільшується пропорційно напруженості поля (ділянка Oa), потім зростання її сповільнюється, крива перегинається (точка b) і знову наближається до прямолінійної, але вже з невеликим нахилом до горизонтальної осі. На цій останній ділянці збільшення напруженості поля обумовлює невелике зростання магнітної індукції; з подальшим пересуванням повзунка реостата P магнітна індукція в електромагнітному осерді практично не підвищується. У цьому разі кажуть, що осердя досягло магнітного насичення.

Зі зменшенням напруженості магнітного поля електромагніту магнітна індукція залізного осердя також починає зменшуватись, але залишається дещо більшою, ніж у процесі намагнічування, при одних і тих же значеннях напруженості. З розімкненням кола струм в електромагніті припиниться, а індукція все-таки матиме деяке значення, що визначається відрізком Oz (див. рис. 21, б). Це свідчить

про те, що в осерді зберігся певний залишковий магнетизм. Якщо припинити розмагнічування, то залізне осердя залишиться штучним (постійним) магнітом і матиме залишкову магнітну індукцію. Розглянуте відставання зменшення магнітної індукції від зниження напруженості магнітного поля називається гістерезисом.

Щоб залізне осердя не мало залишкового магнетизму, потрібно його перемагнітити, тобто здійснити намагнічування у зворотному напрямку. Для цього перемикач P (див. рис. 21, а) треба перевести на контакти 3—4. Тоді в обмотці електромагніту виникне струм протилежного напрямку, а саме: плюс батареї B — контакт 3 — обмотка електромагніту E — реостат P — контакт 4 — мінус батареї B . Згідно з правилом свердлика під дією цього струму в електромагніті виникне магнітне поле, спрямоване зліва направо, тобто протилежне магнітному потоку залишкового магнетизму, яке розмагнітуватиме осердя. Поступово, пересуваючи повзунок реостата, досягнемо положення, за якого напруженість магнітного поля електромагніту матиме значення, що визначається відрізком Oz (див. рис. 21, б). Такому значенню напруженості відповідатиме магнітна індукція в осерді електромагніту, яка дорівнює нулеві, тобто осердя перестане бути магнітом. Напруженість поля, за якої осердя розмагнічується, називається **к о е р с и т и в н о ю** (затримуючою) **с и л о ю**.

Якщо провести повний цикл перемагнічування, тобто знизити силу струму в обмотці електромагніту від якогось найбільшого значення до нуля, потім, змінивши напрямок струму, збільшити його, після чого знову зменшити і т. д., то магнітна індукція змішуватиметься по кривій, яка називається **петлею гістерезису**.

Під час перемагнічування на подолання тертя між молекулярними магнітиками витрачається деяка кількість енергії, що називається втратами на гістерезис. Ця енергія, перетворюючись у теплоту, нагріває перемагнічувані феромагнітні матеріали (частини електричних апаратів). Феромагнітні матеріали мають велику магнітну проникність і характеризуються властивостями намагнічуватись, що можна пояснити ось чим. Безперервний рух електронів у будь-якій речовині можна розглядати як внутрішньомолекулярні струми, що збуджують магнітне поле. Оскільки електрони не тільки рухаються навколо ядра, але й обертаються навколо власної осі, виникає також магнітне поле, обумовлене обертанням електронів, причому воно значно сильніше від поля, що утворилося внаслідок руху електронів навколо ядра. У неферомагнітних речовинах магнітні поля, утворені обертанням електронів навколо власної осі, у кожному атомі взаємно зрівноважуються і тіло позбавлене властивості намагнічуватись. У феромагнітних матеріалах магнітні поля, обумовлені обертальним рухом електронів, не зрівноважені завдяки особливій будові атомів. Під дією цих полів у тілі утворюються намагнічені ділянки, що нага-

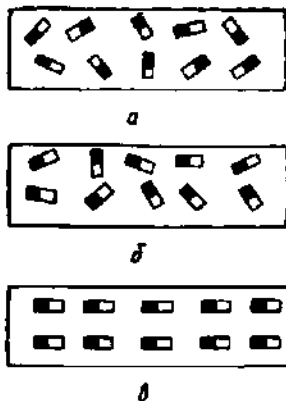


Рис. 22. Схеми ферромагнітного матеріалу:

а — поза магнітним полем; б — у магнітному полі; в — при насиченні.

Осердя з магнітотвердої сталі внаслідок великої коерцитивної сили, властивої цьому матеріалу, значною мірою зберігає магнітні властивості і після зникнення магнітного поля. У такий спосіб виготовляють штучні магніти.

Полярність електромагніту визначають за правилом свердлика. Для цього можна використати ще й інше правило: північний полюс електромагніту знаходиться з того боку, де струм для спостерігача, який дивиться на кінець електромагніту, спрямований проти годинникової стрілки, а південний — де напрямок струму збігається з напрямком руху годинникової стрілки.

Електромагніти широко застосовуються в підймальних та гальмівних механізмах, у верстатах для обробки сталевих деталей, в електроавтоматах, реле та інших пристроях.

§ 25. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

Уявімо два паралельні провідники *ab* і *вг* (рис. 23, а), розміщені на невеликій відстані один від одного. Провідник *ab* приєднано до затискачів батареї *В*; коло вмикається ключем *К*, з замиканням якого через провідник протікає струм у напрямку від *a* до *b*. До кінців провідника *вг* приєднано чутливий амперметр *A*, за відхиленням стрілки якого роблять висновок про наявність струму в цьому провіднику.

Якщо у складеній таким чином схемі замкнути ключ *К*, то в момент замикання кола стрілка амперметра відхилиться. Це буде свідченням наявності струму в провіднику *вг*. Через невеликий проміжок часу (долі секунди) стрілка амперметра займе вихідне (нульове) поло-

дукують найдрібніші магнітики. У разі відсутності зовнішнього магнітного поля магнітики розташовуються безладно (рис. 22, а), і феромагнітне тіло не виявляє магнітних властивостей.

Під час намагнічування залізного осердя деякі магнітики під дією напруженості магнітного поля починають поводитися так, що їхні північні полюси поступово повертаються в один бік, а південні — в інший (рис. 22, б), потім зі збільшенням напруженості магнітного поля повертається й решта молекулярних магнітиків. У залізному осерді, доведеному до магнітного насичення, молекулярні магнітики розташовані так, як це схематично показано на рис. 22, в.

Залізне або сталеве осердя, поміщене всередині соленоїда, під час пропускання струму через соленоїд набуває магнітних вла-

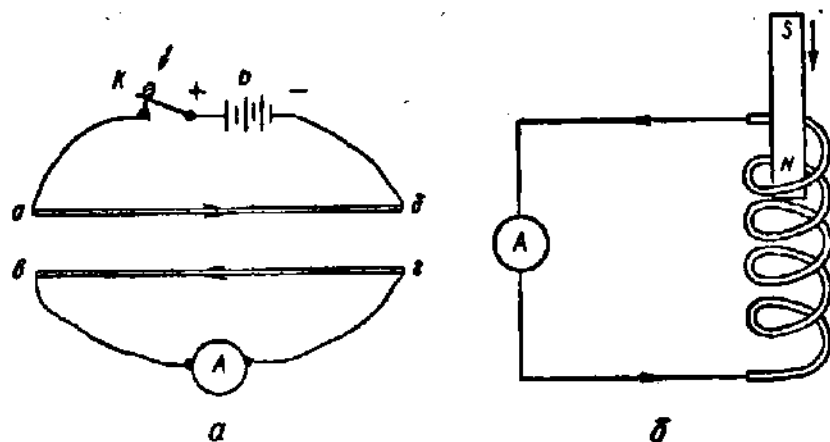


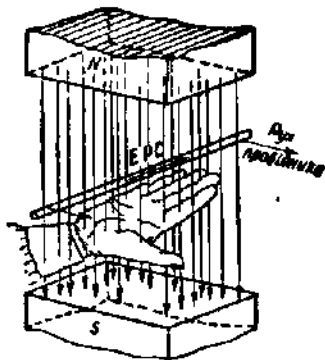
Рис. 23. Схеми виникнення індукційного струму:

а — у разі зміни сили струму в одному з паралельних провідників; б — у разі зміни магнітного поля

ження. Розімкнення ключа *К* знову обумовить короточасове відхилення стрілки амперметра, але вже в інший бік, і це буде свідченням виникнення струму протилежного напрямку. Аналогічне відхилення стрілки амперметра можна спостерігати і в тому випадку, коли при ввімкненому ключі *К* наблизимо провідник *ab* до провідника *вг* або віддалимо від нього. Наближення провідника *ab* до *вг* обумовить відхилення стрілки амперметра в той самий бік, що й під час ввімкнення ключа *К*; віддалення провідника *ab* від провідника *вг* спричинить відхилення стрілки амперметра, аналогічне відхиленню під час вимкнення ключа *К*.

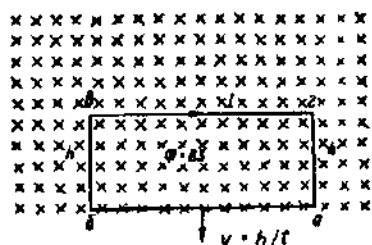
При нерухомих провідниках і замкнутому ключі *К* струм у провіднику *вг* можна викликати зміною сили струму у провіднику *ab*. Аналогічні явища відбуваються і в тому випадку, якщо провідник, який живиться струмом, замінити магнітом або електромагнітом. Так, на рис. 23, б схематично зображено котушку (соленоїд) з ізольованого дроту, до кінців якої приєднано амперметр *A*. Якщо всередину обмотки швидко ввести постійний магніт (або електромагніт), то в момент його введення стрілка амперметра *A* відхилиться. При виведенні магніту також спостерігатиметься відхилення стрілки амперметра, але в інший бік. Електричні струми, що виникають за подібних обставин, називаються індукційними, а причина, що обумовлює появу індукційних струмів, — електрорушійною силою індукції. Ця ЕРС виникає у провідниках під дією змінних магнітних полів, у яких перебувають ці провідники.

Напрямок ЕРС індукції у провіднику, що переміщується в магнітному полі, можна визначити за правилом правої руки (рис. 24), яке



◁ Рис. 24. Правило правої руки.

Рис. 25. Переміщення замкнутого контуру в магнітному полі.



формулюється так: якщо праву руку поставити долонєю до північного полюса так, щоб відігнутий великий палець показував напрямок руху провідника, то чотири інші пальці показуватимуть напрямок ЕРС індукції.

Напрямок ЕРС індукції в нерухомому замкнутому провіднику, контур якого пронизується змінним магнітним потоком, можна визначити, застосувавши правило Максвелла, яке формулюється так: якщо замкнений контур провідника пронизується магнітним потоком, що зменшується, то ЕРС індукції спрямована в той бік, у який доводиться обернути ручку свердлика, що загвинчується поступально в напрямком магнітних ліній. Якщо ж магнітний потік, що пронизує контур провідника, збільшується, то напрямком ЕРС індукції зворотний напрямкові обертання ручки свердлика, загвинчуваного поступально за напрямком магнітних ліній.

Нарешті, напрямок індукційного струму, а отже, й ЕРС індукції визначають за правилом Ленца, яке можна сформулювати так: ЕРС індукції має завжди такий напрямок, за якого створений нею індукційний струм перешкоджає причині, що викликає цю ЕРС.

ЕРС індукції, що виникає в замкнутому провіднику, прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, який пронизує контур цього провідника. Отже, якщо магнітний потік, що пронизує контур замкнутого провідника, зменшився на $\Delta\Phi$ протягом часу Δt , то швидкість зменшення магнітного потоку становить $\Delta\Phi/\Delta t$. Це відношення і являє собою ЕРС індукції: $e = -\Delta\Phi/\Delta t$. Знак мінус означає, що струм, утворений ЕРС індукції, перешкоджає причині, що викликала ЕРС.

Виникнення ЕРС індукції в замкнутому контурі відбувається як у процесі руху цього контура в магнітному полі, так і під час зміни магнітного потоку, що пронизує нерухомий контур.

Якщо контур має w послідовно з'єднаних витків, то індукована ЕРС $e = -w\Delta\Phi/\Delta t$.

Добуток кількості витків на інтенсивність магнітного потоку, що пронизує ці витки, називається потокозчепленням $\psi =$

$= w\Phi$, отже, індукована в котушці ЕРС

$$e = -\Delta\psi/\Delta t.$$

Ця формула виражає закон електромагнітної індукції і є вихідною для визначення ЕРС, індукованих в обмотках електротехнічних апаратів та електричних машин.

Коли контур охоплюється лише частиною магнітного потоку, то ЕРС індукції залежить від швидкості зміни не всього потоку, а тільки частини його.

Припустимо, що прямокутний замкнений контур провідника *абага* (рис. 25), сторони якого дорівнюють l та h (метрів), перебуває у магнітному полі, магнітна індукція якого в усіх точках становить B (тесла) і спрямована за площину рисунка. Нехай контур, залишаючись у площині рисунка, переміщується з рівномірною швидкістю згори до низу і протягом часу t (секунд) виходить за межі магнітного поля. Оскільки контур провідника *абага* переміщується донизу, то магнітний потік, що пронизує контур, зменшується. Отже, напрямком ЕРС індукції збігається з обертальним рухом ручки свердлика, який загвинчується вздовж магнітних ліній, тобто за годинникову стрілкою. Цю ЕРС індукції визначають, виходячи з таких міркувань. Площа, обмежена контуром провідника, $S = lh$. Магнітний потік, що пронизує контур провідника, $\Phi = BS$. Щоб вийти за межі магнітного потоку, тобто щоб змінити магнітний потік від Φ до нуля або на величину $\Delta\Phi = \Phi$, треба, щоб $\Delta t = t$. Отже, $E = \Delta\Phi/\Delta t = \Phi/t$ або $E = Blh/t$.

Частка від ділення шляху h , пройденого провідником, на час t є швидкістю руху цього провідника. Позначивши її літерою v , матимемо $E = Blv$. Якщо в цій формулі магнітна індукція B виражена в теслах, довжина l — в метрах і швидкість v — в метрах на секунду (м/с), то ЕРС індукції виразиться в вольтах. Ця формула справедлива тільки в тому разі, якщо провідник переміщується в магнітному полі в напрямку, перпендикулярному до магнітних ліній цього поля.

Якщо провідник перетинає магнітні лінії під якимсь кутом, то $E = Blv \sin \alpha$, де α — кут між напрямком руху провідника і напрямком вектора магнітної індукції (магнітних ліній).

Індукційні струми виникають не тільки в ізольованих провідниках і обмотках, але і в суцільних металевих масах генераторів, електромагнітних апаратів і механізмів, на які діють змінні магнітні поля. Ці струми, названі вихровими, обумовлюють додаткові витрати енергії, що перетворюється в теплову, яка нагріває частини приладів. Очевидно, що в таких випадках робота цих струмів є не тільки непотрібною, але й шкідливою.

Щоб послабити вплив вихрових струмів, застосовують спеціальне складання осердь з ізольованих сталевих пластин. Осердя електромагнітних пристроїв (трансформаторів, дроселів, електродвигунів

тощо) складають із тонких сталевих листів, укритих папером, окалиною або ізолюючим лаком. Проте повністю уникнути нагрівання, обумовленого вихровими струмами, неможливо, і в тих випадках, коли нагрівання може досягти високого ступеня, застосовують штучне охолодження приладів. Наприклад, потужні трансформатори розміщують в баках з маслом, яке добре відводить теплоту.

Втрати енергії від вихрових струмів залежать не тільки від властивостей матеріалу, в якому вони виникають, та товщини сталевих пластин, з яких складено магнітопровід апарату чи машини, але також від магнітної індукції та швидкості її змінення. У деяких випадках виникнення вихрових струмів виявляється бажаним. Зокрема, на використанні вихрових струмів ґрунтується робота індукційних електродвигунів, індукційних електротопечей для плавлення металів, індукційних електровимірювальних приладів (лічильники електроенергії), а також сушіння деревини, гартування металів тощо.

§ 26. САМОІНДУЦІЯ

У разі зміни магнітного потоку, який пронизує виток провідника, у цьому витку виникає ЕРС індукції. Подібне явище простежується і в тому випадку, коли струм, що протікає по витку, змінюється за силою чи за напрямком. Такий процес виникнення електрорушійної сили індукції називається с а м о і н д у к ц і є ю. Самоіндукцію можна спостерігати, наприклад, під час замикання і розмикання електричного кола. У момент розмикання внаслідок зникнення магнітного потоку в колі індукуються ЕРС самоіндукції, яка прагне підтримувати незмінну силу струму. Під час замикання магнітний потік, утворюваний струмом, що протікає по колу, збільшується, а ЕРС самоіндукції, що появляється, перешкоджає наростанню сили струму.

Отже, якщо коло замикається, то внаслідок протидії ЕРС самоіндукції, сила струму не може миттєво змінюватися, а якщо коло розмикається, то також внаслідок протидії ЕРС самоіндукції зникнення струму в колі настає не миттєво, а поступово.

Явище самоіндукції властиве не тільки обмоткам, але й прямолінійним провідникам. У цьому випадку ЕРС самоіндукції обумовлюється магнітним потоком, що виникає в контурі, обмеженому двома провідниками або провідником і землею, якщо земля є елементом кола.

Припустимо, що два прямолінійні провідники *ab* та *cd* (рис. 26) приєднані до батареї *B* за допомогою ключа *K*. З увімкненням ключа в колі виникає струм. В перші моменти після увімкнення ключа *K* контур, складений з провідників *ab* та *cd*, пронизується наростаючим магнітним пото-

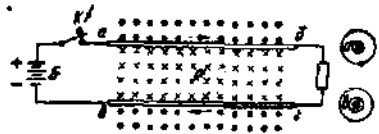


Рис. 26. Схема виникнення ЕРС самоіндукції.

ком Φ , магнітні лінії якого (за правилом свердлика) будуть спрямовані в межах контуру за площину рисунка, а поза контуром — із-за площини рисунка.

Під дією наростаючого магнітного потоку Φ у замкненому колі виникає ЕРС самоіндукції, яка буде спрямована проти оберտального руху ручки свердлика, тобто назустріч струмові батареї *B*.

Якщо замкнений провідник складається з одного витка, то магнітний потік Φ , який пронизує контур цього провідника, за постійної магнітної проникності прямо пропорційний силі струму *I*, що протікає через провідник. Позначивши коефіцієнт пропорційності літерою *L*, можемо записати таку рівність: $\Phi = LI$ або $L = \Phi/I$, де *L* — індуктивність даного провідника. Якщо розглядуваний замкнений провідник складається не з одного витка, а являє собою обмотку з ω витків, що охоплюють один і той же магнітний потік Φ , то індуктивність такої обмотки $L = \omega\Phi/I = \psi/I$, де $\psi = \omega\Phi$ — потокозчеплення.

Одиницею індуктивності є генрі (Гн). Один генрі — це індуктивність такого кола, в якому за рівномірної зміни сили струму на один ампер за секунду індукуються ЕРС самоіндукції один вольт.

Якщо в колі з індуктивністю *L* сила струму протягом часу Δt змінюється на величину ΔI , то в такому колі виникає ЕРС самоіндукції $e = -L\Delta I/\Delta t$. Знак мінус у цій формулі показує, що зі зменшення сили струму (приріст ΔI — від'ємна величина) ЕРС самоіндукції буде додатна і навпаки.

Магніторушійна сила $F = \omega I$ збуджує магнітне поле, яке на своєму шляху зустрічає магнітний опір $R_m = l/\mu_0 S$, де *l* — довжина магнітного шляху, *m*; *S* — площа перерізу цього шляху, *m*²; μ_0 — абсолютна магнітна проникність середовища, в якому замикається магнітний потік.

Аналогічно електричному колу закон Ома для магнітного кола можна записати у такому вигляді: $\Phi = F/R_m = \omega I/R_m$ та $\psi = \omega\Phi = \omega^2 I/R_m$.

Отже, індуктивність

$$L = \psi/I = \omega^2/R_m = \mu_0 S \omega^2/l.$$

Магнітне коло котушки складається з двох частин: тієї, що всередині котушки, і тієї, що зовні. Магнітний опір також складається з двох частин: внутрішнього $R_{m,вн}$ та зовнішнього $R_{m,з}$. Визначення $R_{m,з}$ для магнітного потоку, що розходиться у просторі, надзвичайно складне.

Якщо довжина котушки *l* значно більша від її діаметра *d* ($l \gg d$), то магнітним опором зовнішньої частини можна знехтувати і вважати індуктивність котушки

$$L = (4\pi S \omega^2/l) \cdot 10^{-7}.$$

Якщо котушка розміщена на замкненому сталевому магнітопроводі (дросель), відносна магнітна проникність матеріалу якого дорів-

ное μ , то індуктивність дроселя

$$L = (4\pi S\omega^2/l)\mu \cdot 10^{-7}.$$

У випадку, коли в магнітопроводі дроселя зроблено немагнітний вазор довжиною l_s , індуктивність дроселя

$$L = 4\pi S\omega^2/(l_s + l_c/\mu) \cdot 10^{-7},$$

де l_c — довжина середньої магнітної лінії по сталі дросельного осердя м.

§ 27. ЕНЕРГІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

З увімкненням кола, у складі якого є опір та індуктивність, сила струму не одразу досягне свого усталеного значення $I = U/R$, оскільки індуквана ЕРС самоіндукції $e_L = -L\Delta i/\Delta t$ протидіє змінню сили струму, затримуючи її збільшення (рис. 27). При поступовому наростанні сили струму в оточуючому просторі накопичуються частки енергії, витраченої джерелом струму.

Коли сила струму в колі досягає усталеного значення $I = U/R$, її наростання припиняється і ЕРС самоіндукції зникає. Отже, з увімкненням напруга джерела електроенергії витрачається не тільки на подолання опору R , але й на подолання ЕРС самоіндукції, тобто $U = iR + (-e_L) = (iR + L\Delta i/\Delta t)$.

Після множення цього рівняння напруги на $i\Delta t$ маємо енергетичне рівняння кола: $Ui\Delta t = i^2R\Delta t + Li\Delta i$. Ліва частина цього рівняння виражає енергію, яку віддає джерело електричного кола протягом часу Δt . Перший член правої частини рівняння показує енергію, витрачену на нагрівання опору R за цей же час Δt . Другий член правої частини рівняння визначає енергію, яка накопичується в магнітному потоці за час Δt при збільшенні сили струму на Δi , тобто $\Delta W_m = Li\Delta i = \psi\Delta i$.

Якщо в магнітному полі немає феромагнітних матеріалів, то магнітний потік Φ , а отже, й потокозчеплення ψ прямо пропорційні силі струму I . Лінійна залежність потокозчеплення від сили струму на рис. 28 зображена прямою лінією, що проходить через початок координат і утворює з віссю сили струму кут α , який залежить від вибраного масштабу для ψ та I . На графіку зміна енергії магнітного поля $\psi\Delta i$ зобразиться заштрихованою площею. В момент, коли магнітний потік досягне значення $\Phi = \omega I/R_m$, яке відповідає усталеному значенню сили струму $I = U/R$, ЕРС самоіндукції зникне і накопичення енергії в магнітному полі припиниться. Накопичена в магнітному полі енергія W_m зі збільшенням сили струму в колі виразиться на графіку сумою всіх площ $\psi\Delta i$ і при зміні сили струму від 0 до усталеного значення I , тобто площею прямокутного трикутника з катетами ψ та I , тобто $W_m = \psi I/2 = LI^2/2$.

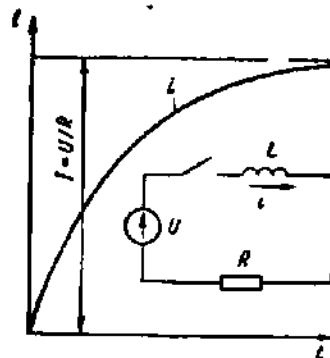


Рис. 27. Графік наростання сили струму в колі з індуктивністю та умовне позначення такого кола.

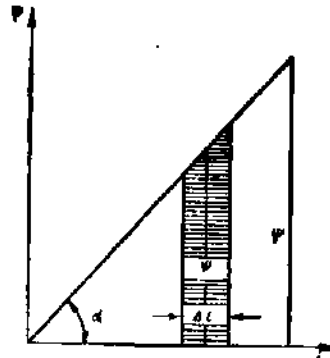


Рис. 28. Графічне зображення накопичення енергії в магнітному полі.

Для деяких розрахунків потрібен запас енергії в одиниці об'єму магнітного поля, який називається питомою енергією магнітного поля. Якщо в попередній формулі замінити $\psi = \omega\Phi = \omega BS$ та $\omega l = Hl$, то матимемо $W_m/IS = W_m/V = BH/2$, де $V = IS$ — об'єм, який займає рівномірне магнітне поле.

§ 28. ВЗАЄМОІНДУКЦІЯ

Розглянуте явище виникнення індукційних струмів у паралельних провідниках називається взаємоіндукцією.

Взаємоіндукція простежується не лише в моменти виникнення та зникнення струму, але й за всякої його зміни. ЕРС, що виникає в таких випадках у колі, яке безпосередньо не має джерел струму, називається ЕРС взаємоіндукції. Поява ЕРС взаємоіндукції пояснюється тим, що контур замкненого провідника пронизується змінним магнітним потоком, який утворюється струмом, що протікає по сусідньому провіднику.

Кожен з контурів I і II (рис. 29) складається з одного замкненого витка провідника. Під час протікання струму силою I_1 по колу I від якогось джерела (на рисунку не показано) збуджується магнітний потік Φ_1 , який частково пронизує й контур кола II . Очевидно, що

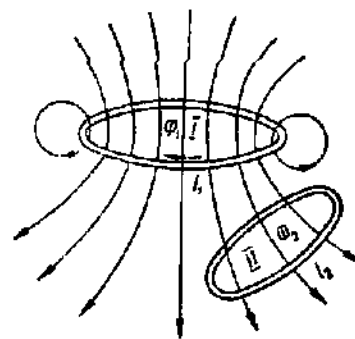


Рис. 29. Схема виникнення ЕРС взаємоіндукції у замкнених витках.

весь магнітний потік Φ_1 , і його частина Φ_2 , яка пронизує контур кола II , прямо пропорційні силі струму I_1 . Отже, співвідношення між магнітним потоком Φ_2 та силою струму I_1 можна подати у вигляді рівності $\Phi_2 = MI_1$, де M — коефіцієнт, що залежить від геометричних розмірів контурів та їх взаємного розташування. Цей коефіцієнт називається взаємною індуктивністю. Взаємна індуктивність так само, як і індуктивність, вимірюється в генрі, мілігенрі та мікрогенрі. Взаємну індуктивність один генрі мають два контури в тому разі, коли в одному з них виникає ЕРС взаємоіндукції один вольт за рівномірної зміни сили струму на один ампер за секунду у другому контурі.

Взаємну індуктивність M між двома контурами можна виразити індуктивністю цих контурів. Якщо індуктивність одного кола L_1 , а другого — L_2 і магнітний потік, що виникає в контурі першого кола (яке впливає), повністю пронизує контур другого кола (на яке впливає), то $M = \sqrt{L_1 L_2}$. Оскільки частина магнітних ліній першого кола практично завжди замикається поза другим колом або, як кажуть, завжди відбувається розсіяння магнітного потоку, то $M < \sqrt{L_1 L_2}$.

Отже, в попереднє рівняння має бути введений певний множник k , який менший від одиниці: $M = k \sqrt{L_1 L_2}$. Множник k називається коефіцієнтом зв'язку.

Явище взаємоіндукції використовується в трансформаторах. У ряді випадків явище взаємоіндукції проявляє шкідливий вплив. Наприклад, у разі наближення проводів високовольтного кола до ліній зв'язку взаємоіндукція може бути не лише джерелом перешкод, але й небезпечних перенапруг у лініях зв'язку.

Контрольні запитання

1. Як визначити напрямок магнітних ліній поля, збудженого навколо провідника зі струмом?
2. Що називається магнітною індукцією?
3. Що називається напруженістю магнітного поля?
4. Як формулюється закон повного струму?
5. Що називається абсолютною та відносною магнітною проникністю?
6. Сформулюйте правило лівої руки.
7. У чому полягає суть взаємодії провідників зі струмом?
8. Які процеси виникають під час перемагнічування сталі?
9. Сформулюйте правило правої руки.

Розділ IV. ЗМІННИЙ СТРУМ І КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

§ 29. ОДЕРЖАННЯ ЗМІННОЇ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ

Як відомо, постійний струм в металах являє собою усталений поступальний рух вільних електронів. Якщо ж ці електрони замість поступального здійснюють коливальний рух, то струм періодично, через рівні проміжки часу, змінюється як за силою, так і за напрямком і називається змінним.

Для змінного струму характерна здатність трансформуватися (змінювати напругу за допомогою трансформаторів), що забезпечує економне передавання електричної енергії на великі відстані. Крім того, двигуни змінного струму відзначаються простотою будови й малими габаритами. Тому змінний струм застосовується дуже широко і майже вся електрична енергія виробляється генераторами змінного струму.

Схему будови найпростішого генератора змінного струму наведено на рис. 30. У магнітному полі електромагніту NS , яке збуджується постійним струмом у його обмотці, поміщено виток із провідників 1 і 2. Кінці витка з'єднані з металевими кільцями, які ізольовані одне від одного та від корпусу й обертаються разом з витком. На кільцях установлені нерухомі щітки 3, якими виток можна замкнути на опір навантаження.

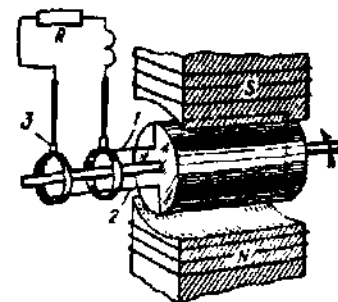


Рис. 30. Схеми будови найпростішого генератора змінного струму.

Припустимо, що магнітне поле між полюсами N і S рівномірне, тобто магнітна індукція за значенням і напрямком всюди однакова. За час одного оберту площина витка описує кут 360° . Розіб'ємо цей кут на вісім рівних частин, по 45° кожна, і розглянемо, як змінюватиметься магнітний потік, що пронизує контур витка, під час його переходу з одного полюса в інше у процесі обертання. Окремі положення витка відносно магнітного поля показані у верхній частині рис. 31.

Почнемо розглядати зміну ЕРС з того моменту, коли площина витка розташована перпендикулярно до напрямку магнітних ліній (положення I). У цей момент контур витка пронизується найбільшим магнітним потоком, який позначимо Φ_1 ; рух виткових провідників проходить у вертикальному напрямку, який збігається з напрямком магнітних ліній, отже, провідники не перетинають магнітних ліній, а тому магнітний потік, що пронизує контур витка, не змінюється і ЕРС дорівнює нулеві.

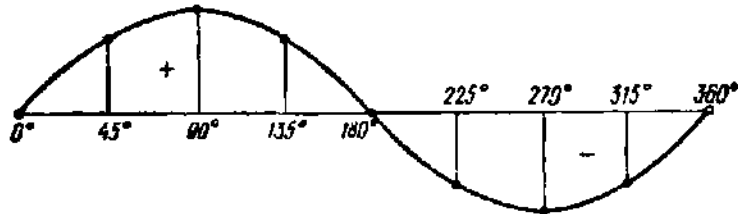
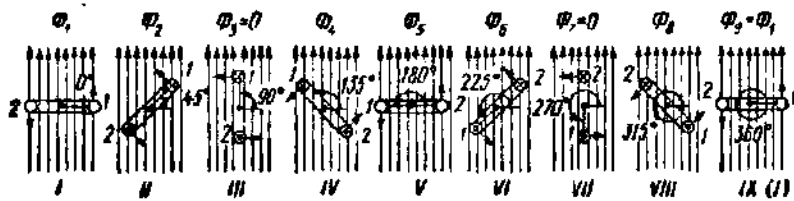


Рис. 31. Часова діаграма.

Починаючи з цього положення, виткові провідники 1 і 2, рухаючись по колу, переміщуються під кутом до напрямку магнітних ліній і перетинають їх. Перетнуті магнітні лінії опиняються поза витком і, отже, магнітний потік, що пронизує витковий контур, зменшується. Оскільки цей магнітний потік змінюється, то на основі закону електромагнітної індукції у витку виникає ЕРС індукції. Під час переходу площини витка з положення I в положення II, тобто під час повороту на кут 45° , ЕРС індукції зростає до певного значення, яке визначається відношенням зміни магнітного потоку від Φ_1 до Φ_2 , тобто $\Phi_1 - \Phi_2$, до часу Δt , протягом якого відбувається зміна. Електрорушійна сила у витку має такий напрямок (положення III): у провіді 1 — за площину рисунка, у провіді 2 — із-за площини рисунка. Умовимося вважати цей напрямок ЕРС додатним. У такому разі значення ЕРС у замкненому колі витка в момент проходження його через положення II маємо відкласти у вигляді деякого відрізка, як це показано на діаграмі в нижній частині рис. 31.

Під час переходу площини витка з положення II в положення III, тобто під час повороту ще на кут 45° , магнітний потік, що пронизує контур витка, зменшившись до нуля, зміниться на $\Phi_2 - 0 = \Phi_2$. Оскільки в цьому випадку магнітний потік зміниться більше, ніж під час переходу витка з положення I в положення II, то ЕРС у витку, коли він перебуває у положенні III, більша від ЕРС, яка відповідає положенню II. Тому значення ЕРС, яке відповідає положенню III витка, коли площина його знаходиться під кутом 90° до напрямку вихідного положення, маємо відкласти у вигляді відрізка більшої величини, ніж попередній. Цей відрізок, як і попередній, зобразимо на діаграмі вище від горизонтальної осі, тому що в обох провадах

1 і 2 електрорушійна сила має позитивний напрямок, тобто у провіді 1 — за площину рисунка, у провіді 2 — із-за площини рисунка, в чому неважко перекопатися, застосувавши правило правої руки.

З подальшим обертанням площини витка ЕРС у ньому зменшуватиметься, залишаючись додатною. Коли площина витка повернеться на 180° відносно початкового положення і займе положення V, ЕРС у ньому зменшиться до нуля, незважаючи на те, що магнітний потік, який пронизує контур витка, має найбільше значення, як і в положенні I.

Після переходу площини витка через положення V напрямок ЕРС індукції в ньому зміниться: у провіді 1 — із-за площини рисунка, у провіді 2 — за площину рисунка. В міру обертання витка ЕРС у ньому за абсолютним значенням збільшується. У момент проходження витка через положення VII ЕРС буде найбільшою, однаковою за абсолютним значенням, але протилежною за знаком ЕРС у витку в положенні III. З подальшим обертанням витка на 360° від початкового положення ЕРС у його площині дорівнює нулеві. З цього моменту процес зміни ЕРС повторюється.

Якщо з'єднати вершини відрізків, які виражають собою значення ЕРС для певних положень площини витка, плавною лінією, то одержимо часову діаграму у формі синусоїди. Змінна ЕРС і сила струму, що змінюються згідно з зазначеною кривою, називаються синусоїдними.

Отже, значення ЕРС, індукованої у провіднику, що переміщується з рівномірною швидкістю в однорідному полі, залежать від кута між напрямком магнітних ліній і напрямком руху цього провідника.

§ 30. СИНУСОЇДНА ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА

Змінний синусоїдний струм виникає в електричному колі під дією синусоїдної електрорушійної сили. Електрорушійна сила індукції у прямолінійному провіднику, який перетинає магнітні лінії (рис. 32), виражається формулою $e = Blv \sin \alpha$, де B — магнітна індукція, l — довжина провідника, v — швидкість його переміщення.

При обертанні замкненого провідника в магнітному полі легко підрахувати значення ЕРС, індукованої в цьому провіднику, якщо знати кут α , на який повернулася площина провідника з вихідного положення. Максимального значення, або амплітуди, ЕРС досягає в той момент, коли кут $\alpha = 90^\circ$. Позначивши амплітуду ЕРС через E_m , знайдемо $E_m = Blv$.

Через амплітуду можна виразити миттєве значення ЕРС у довільний момент, коли сторони замкненого провідника перетинають магнітні лінії під кутом α : $e = E_m \sin \alpha$. Кут α в даному випадку називається фазовим кутом ЕРС, або фазою.

Електрорушійна сила генератора змінного струму, як і в електричному колі постійного струму, зрівноважується спадами напруги на

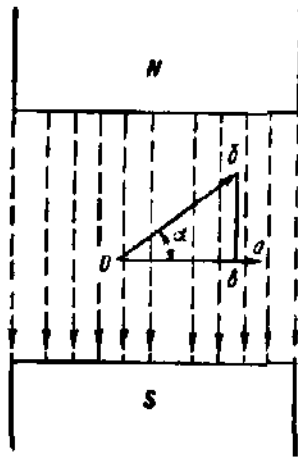
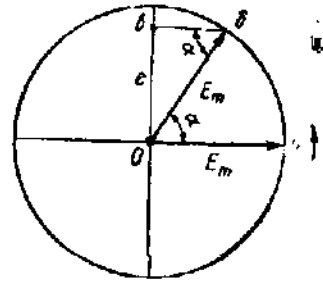


Рис. 32. Схема переміщення провідника під кутом до напрямку магнітних ліній.

Рис. 33. Векторна діаграма ЕРС.



внутрішньому опорі генератора та опорі зовнішнього кола. Ту частину ЕРС, яка зрівноважується у зовнішньому колі, називають напругою генератора і її миттєве значення позначають літерою e , а максимальне значення (амплітуду) — літерою U_m .

Щоб визначити миттєве значення електрорушійної сили e , амплітуду E_m треба помножити на синус фазового кута (фази) α . Отже, якщо побудувати відрізок Oa (рис. 33), який дорівнює (у масштабі напруги) амплітуді E_m , і обернути його проти годинникової стрілки зі сталою частотою обертання (цей напрямок обертання прийнято вважати додатним), то кінець вектора опише деяке коло з радіусом E_m .

Припустимо, що через певний час t (в секундах) вектор повернувся на кут α і зайняв напрямок Ob . Провівши перпендикуляр з кінця відрізка Ob на вертикальний діаметр, матимемо прямокутний трикутник Oab . З цього трикутника знаходимо $Ob = E_m \sin \alpha$. Співставляючи одержане рівняння з рівнянням $e = E_m \sin \alpha$, переконуємось, що відрізок Ob являє собою миттєве значення ЕРС, яке відповідає фазовому куту α .

Спосіб зображення ЕРС, сили струму й напруги у вигляді прямих ліній певної довжини та певного напрямку, або векторів, широко застосовується в теорії змінних струмів. Співвідношення між окремими електричними параметрами та їх взаємне розташування на площині, виражене графічно у формі векторів, називається векторною діаграмою.

Проміжок часу, потрібний для здійснення змінною ЕРС повного циклу своїх змін, називається періодом коливання, або скорочено періодом. Період позначають літерою T і вимірюють у секундах.

Кількість періодів за одну секунду або величина, обернена періоді, називається частотою коливання, або скорочено частотою. Частота позначається літерою $f = 1/T$ і вимірюється в герцах (Гц). Оскільки в розглядуваній діаграмі радіус $Oa = E_m$ протягом одного періоду T описує кут $\alpha = 2\pi = 360^\circ$, то відношення $2\pi/T$ є кут, що описується тим самим радіус-вектором за одну секунду. Отже, відношення $2\pi/T$ являє собою кутову частоту обертання радіус-вектора. Кутову частоту позначають літерою ω (омега) і виражається вона формулою $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$. Якщо ω являє собою кут, що описується радіус-вектором за одну секунду, то за час t кут α , що описується тим самим радіус-вектором і називається фазою, становитиме $\alpha = \omega t = 2\pi t/T = 2\pi ft$.

§ 31. АКТИВНИЙ ОПІР У КОЛІ ЗМІННОГО СТРУМУ

Розглянемо явища, які виникають у зовнішньому колі з резистором. Якщо опір постійному струмові кола дорівнює R_1 , то під час протікання по цьому колу змінного струму опір зростає і дорівнюватиме деякій величині R . Досвід показує, що зі збільшенням частоти змінного струму опір R зростає. Опір провідника (який не має ні індуктивності, ні ємності) змінному струмові називається активним опором. Оскільки активний опір провідника зростає зі збільшенням частоти, то це явище, що виникає переважно внаслідок поверхневого ефекту, має суттєве значення при високих частотах.

Щоб пояснити поверхневий ефект, уявно поділимо прямолінійний провід по всій його довжині на ряд концентричних циліндрів з рівновеликими кільцевими поперечними перерізами (рис. 34). Якщо по такому проводу протікає постійний струм, то, очевидно, густина струму, тобто кількість ампер на один квадратний сантиметр площі перерізу в усіх кільцях буде однаковою і навколо кожного з них утвориться постійне магнітне поле. Отже, уявлені нами концентричні провідники будуть оточені замкненими магнітними потоками, причому в міру наближення до осі проводу потоки, що охоплюють ці провідники, додаються, збільшуватимуться. Припустимо тепер, що по тому ж провіднику протікає змінний струм. У цьому випадку магнітні потоки, що виникають навколо уявлених нами циліндричних провідників, також будуть змінними. Згідно з законом електромагнітної індукції, в кожному з циліндричних провідників з'являтимуться ЕРС самоіндукції, які збільшуватимуться в міру наближення цих провідників до осі проводу.

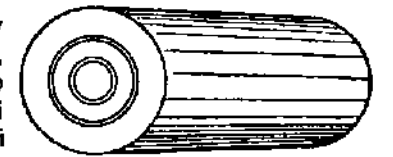


Рис. 34. Провідник, поділений на концентричні циліндри.

Отже, в разі змінного струму змінні магнітні потоки у проводі наводять електрорушійні сили, які протидіють основній нарузі, прикладеній до кінців проводу. Ця протидія буде тим більшою, чим ближче розглядуваний переріз до осі проводу. Внаслідок цього струм у перерізі проводу розподіляється з густинною, яка збільшується від осі до поверхні проводу.

Явище поверхневого ефекту немов би зменшує корисну площу перерізу проводу, а отже, збільшує опір R .

При частоті струму 50 Гц, яка застосовується в промисловій електротехніці, і невеликій площі поперечного перерізу провідника поверхневий ефект незначно збільшує опір, а тому на практиці активний опір провідників можна вважати однаковим з їхнім опором постійному струмові. У разі струмів високих частот різниця між цими опором стає значною.

Припустимо, що до затискачів кола (рис. 35, а) від генератора змінного струму Γ подається змінювана за синусоїдним законом напру-

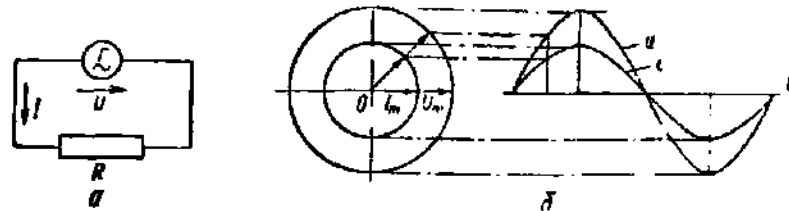


Рис. 35. Коло змінного струму з активним навантаженням:
а — схема; б — векторна й часова діаграми для напруги та сили струму в колі з активним опором.

га, тобто $u = U_m \sin \alpha = U_m \sin \omega t$. Сила струму, що протікає в будь-який момент, визначиться за законом Ома як частка від ділення миттєвого значення напруги на активний опір R : $i = u/R = (U_m/R) \sin \omega t$. Це рівняння показує, що силу струму можна зобразити графічно як вектором, так і синусоїдною кривою (рис. 35, б). Якщо амплітуда сили струму $I_m = U_m/R$, то миттєве значення сили струму $i = I_m \sin \omega t$. Для початкового моменту (початок періоду), коли $t = 0$, фаза $\omega t = 0$. Тому $u = U_m \sin \omega t = 0$ та $i = I_m \sin \omega t = 0$.

Отже, початки синусоїд, що зображують напругу та силу струму, збігаються з початком періоду. Вектор напруги U_m і вектор сили струму I_m мають бути накреслені горизонтально, з правого боку від точки O , причому вектор U_m — у масштабі напруги, а вектор I_m — у масштабі сили струму.

Як бачимо з часових діаграм, сила струму і напруга одночасно дорівнюють нулеві, одночасно досягають своїх максимальних значень (амплітуд) і одночасно змінюють знак, переходячи через нульові значення. Такі одночасні зміни напруги і сили струму свідчать про те,

що вони збігаються за фазою. Отже, якщо у зовнішньому колі є лише активний опір і немає ні котушки індуктивності, ні конденсатора, то напруга, прикладена до цього кола, і сила струму, що протікає в ньому, збігаються за фазою ($u = U_m \sin \omega t$ та $i = I_m \sin \omega t$), являючи собою миттєві значення напруги та сили струму, що стосуються окремих моментів, і не визначають значень напруги та сили струму за певний проміжок часу. Тому, щоб оцінити силу змінного струму, її прирівнюють до еквівалентної сили постійного струму, який, протікаючи по такому ж опорі, що і змінний струм, здійснює однакою з ним теплову дію, тобто протягом того самого проміжку часу (одного або кількох періодів T) виділяє однакою кількість теплоти. Таке значення сили змінного струму називається діючим.

Очевидно, що діюче значення сили струму менше від амплітудного. Відношення між максимальним значенням сили змінного струму I_m та її діючим значенням I дорівнює $\sqrt{2} = 1,414$, тобто $I_m/I = \sqrt{2}$ або $I_m = I\sqrt{2} = 1,414I$ та $I = I_m/\sqrt{2} = 0,707I_m$.

Такі співвідношення стосуються діючих значень напруги U та ЕРС E , тобто $U_m = U\sqrt{2} = 1,414U$ та $E_m = 1,414E$ або $U = 0,707U_m$ та $E = 0,707E_m$.

Прилади, призначені для вимірювання напруги та сили струму (вольтметри та амперметри), показують дійсні значення цих величин. Наприклад, якщо вольтметр показує напругу змінного струму 220 В, то максимальне значення цієї напруги $U_m = 220\sqrt{2} = 311$ В.

§ 32. КОТУШКА ІНДУКТИВНОСТІ В КОЛІ ЗМІННОГО СТРУМУ

Припустимо, що змінну напругу з амплітудою U_m прикладено до затискачів котушки індуктивністю L з таким малим активним опором R , що ним можна знехтувати (рис. 36, а). Якщо замість змінної напру-

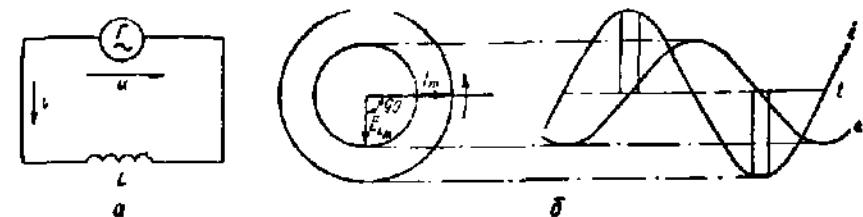


Рис. 36. Котушка індуктивності в колі змінного струму:
а — схема; б — векторна й часова діаграми для сили струму та ЕРС.

ги прикласти до цієї котушки постійну напругу, то, зважаючи на зовсім незначний активний опір, сила струму в колі досягне дуже великого значення. У разі змінної напруги сила струму в котушці буде меншою. Це пояснюється тим, що в цьому випадку (за змінної напруги)

в котушці виникає змінна ЕРС самоіндукції, яка геометрично додається до прикладеної напруги і в результаті впливає на силу струму.

Як відомо, ЕРС самоіндукції виражається формулою

$$e_L = -L(\Delta i/\Delta t).$$

Струм у колі з індуктивністю L , протікає під дією напруги енергетичного джерела u та ЕРС самоіндукції e_L , що виникає в колі внаслідок зміни сили струму, тобто $i = (u + e_L)/R$, звідки $u = (-e_L) + iR$. Через те що у нашому випадку $R = 0$, то $u = -e_L = L\Delta i/\Delta t$, де $\Delta i/\Delta t$ — швидкість зміни сили струму в часі.

У момент t сила струму в колі $i = I_m \sin \omega t$, а через певний відрізок часу Δt сила струму буде $i + \Delta i = I_m \sin \omega(t + \Delta t)$. Отже, за цей відрізок часу сила струму зміниться на $\Delta i = I_m [\sin \omega(t + \Delta t) - \sin \omega t]$. Синус суми $\sin(\omega t + \omega \Delta t) = \sin \omega t \cos \omega \Delta t + \cos \omega t \sin \omega \Delta t$, причому косинус дуже малого кута $\omega \Delta t$ дорівнює одиниці ($\cos \omega \Delta t = 1$), а синус цього кута дорівнює відповідній дузі ($\sin \omega \Delta t = \omega \Delta t$). На основі цього маємо: $\Delta i = I_m (\sin \omega t + \omega \Delta t \cos \omega t - \sin \omega t) = I_m \omega \Delta t \cos \omega t$; швидкість зміни сили синусоїдного струму $\Delta i/\Delta t = I_m \omega \cos \omega t$; прямо пропорційні цій швидкості ЕРС самоіндукції та напруга джерела енергії $u = -e_L = I_m \omega L \cos \omega t = I_m \omega L \sin(\omega t + 90^\circ)$.

Векторна діаграма показує, що між силою струму та ЕРС самоіндукції існує різниця фаз (зсув фази). Сила струму випереджає ЕРС самоіндукції на кут $\varphi = 90^\circ$ (рис. 36, б).

Амплітуда ЕРС самоіндукції E_{Lm} , прямо пропорційна швидкості зміни сили струму в часі, залежно від кутової частоти ω та амплітуди сили змінного струму I_m виражається формулою $E_{Lm} = \omega L I_m$. З цієї формули видно, що за незмінної індуктивності L ЕРС самоіндукції збільшується зі збільшенням кутової частоти ω , тобто зі збільшенням частоти змінного струму f . Діюче значення ЕРС самоіндукції $E_L = \omega L I_m / \sqrt{2} = \omega L I$, де I — діюче значення сили струму.

Оскільки ЕРС самоіндукції відстає за фазою від сили струму на кут 90° і напруга, прикладена до затискачів котушки, долає дію ЕРС, тобто спрямована до ЕРС протилежно, то ця напруга випереджає силу струму за фазою на кут 90° , що зображено на векторній діаграмі (рис. 37). Векторна діаграма показує, що в колі з котушкою індуктивності без активного опору напруга, прикладена до цього кола, випереджає силу струму за фазою на кут $\varphi_1 = 90^\circ$, причому сила струму також

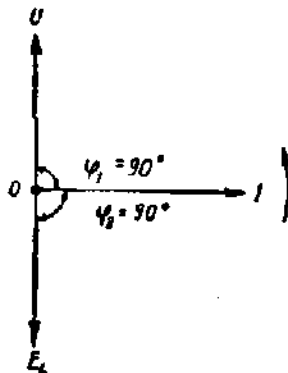


Рис. 37. Векторна діаграма сили струму, напруги та ЕРС самоіндукції для кола з котушкою індуктивності.

випереджає ЕРС самоіндукції за фазою на кут $\varphi_2 = 90^\circ$.

Діюче значення напруги, прикладеної до кола з котушкою індуктивності, $U = \omega L I$, звідки $I = U/(\omega L)$.

Ця формула виражає собою закон Ома для кола змінного струму з котушкою індуктивності. Добуток ωL називається і н д у к т и в н и м о п о р о м, який позначається літерою $X_L = \omega L$ і вимірюється в омах. Як видно з цього виразу, індуктивний опір зростає зі збільшенням частоти струму.

§ 33. КОЛО ЗМІННОГО СТРУМУ

З АКТИВНИМ ТА ІНДУКТИВНИМ ОПОРАМИ

Електричне коло з самим лише індуктивним опором в дійсності неможливе, бо будь-яка обмотка, крім індуктивного опору, має й активний опір. Тому розглянемо випадок, коли приймач, ввімкнений в коло змінного струму, має активний опір R та індуктивність L , тобто індуктивний опір (рис. 38, а).

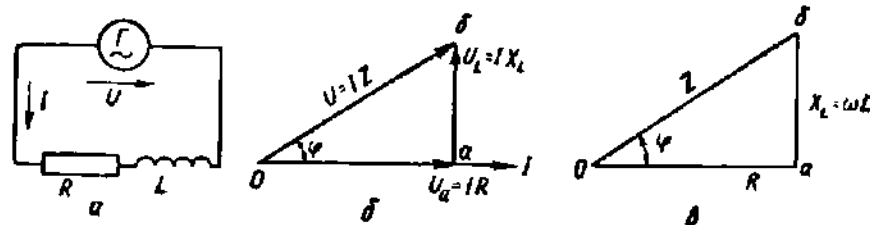


Рис. 38. Коло змінного струму з активним опором та котушкою індуктивності:

а — схема; б — векторна діаграма; в — трикутник опорів.

Припустимо, що по колу проходить змінний струм частотою, що відповідає кутовій частоті $\omega = 2\pi f$; діюче значення сили струму — I , а початкова фаза її дорівнює нулеві; сила струму зображується вектором I , розташованим горизонтально (рис. 38, б). Струм силою I , проходячи через активний опір R , утворює спад напруги $U_a = IR$. Напруга на активному опорі збігається за фазою з силою струму. Тому вектор напруги U_a на діаграмі побудовано за напрямком вектора сили струму I . Напруга U_a називається активним спадом н а п р у г и. Через те що в розглядуваному колі є й котушка індуктивності, для подолання ЕРС самоіндукції потрібна напруга $U_L = IX_L$, яка називається і н д у к т и в н и м с п а д о м н а п р у г и. Напруга на котушці індуктивності випереджає за фазою силу

струму на кут 90° . Тому вектор напруги U_L побудовано під кутом 90° в бік випередження (проти годинникової стрілки).

Отже, напруга на затискачах кола дорівнює геометричній сумі векторів $U_a = IR$ та $U_L = IX_L$. Додавши ці вектори геометрично, матимемо вектор напруги U , який визначає своїм напрямком і величиною діюче значення напруги генератора в колі.

Вектор I відстає від вектора U на певний кут φ . Крім того, вектор U є гіпотенузою прямокутного трикутника Oab (рис. 38, б), який називається трикутником напруги. Катет трикутника $Oa = U_a$, а катет $ab = U_L$. Тому можна записати: $U^2 = U_a^2 + U_L^2$ або $U^2 = (IR)^2 + (IX_L)^2 = I^2(R^2 + X_L^2)$. Добуваючи квадратний корінь з обох частин останньої рівності, дістаємо $U = I\sqrt{R^2 + X_L^2}$, звідки $I = U/\sqrt{R^2 + X_L^2}$. Ця формула виражає собою закон Ома для кола змінного струму з активним та індуктивним опором. Знаменник у цьому виразі позначається літерою Z і називається повним опором кола:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}.$$

Грунтуючись на цій рівності, можемо побудувати прямокутний трикутник (рис. 38, в) з катетами R та $X_L = \omega L$ і гіпотенузою Z , який називається трикутником опорів кола з активним та індуктивним опором. З трикутника опорів можна визначити кут зсуву фаз φ між напругою, прикладеною до кола, та силою струму в ньому: $\cos \varphi = R/Z$. Знаючи R і Z , неважко за $\cos \varphi$ визначити кут φ .

§ 34. КОНДЕНСАТОР У КОЛІ ЗМІННОГО СТРУМУ

З увімкненням конденсатора ємністю C (рис. 39, а) під постійну напругу U він заряджається і на його обкладках накопичуються однакові, але протилежні за знаком кількості зарядів $Q = CU$. Якщо заряджений конденсатор від'єднати від джерела струму, то він, зберігаючи заряд, матиме деяку напругу U_C . З'єднавши обкладки зарядженого конденсатора між собою через якийсь опір R (рис. 39, б), можна переконатися (за допомогою вимірковального приладу) в тому, що конденсатор, розряджуючись, дає короткотерміновий струм через опір R . Напрямок струму в колі під час розрядження конденсатора протилежний його напрямкові під час зарядження.

Якщо розглядати процеси, які відбуваються в колі з конденсатором та джерелом змінного струму з синусоїдною напругою $u = U_m \sin \omega t$, то неважко помітити, що ці процеси зводяться до періодичного зарядження та розрядження конденсатора.

Припустимо, що генератор змінного струму замкнений на конденсатор. Зобразимо зміну напруги на затискачах генератора на часовій діаграмі (рис. 39, в) у вигляді синусоїдної кривої $abed$, а вектор

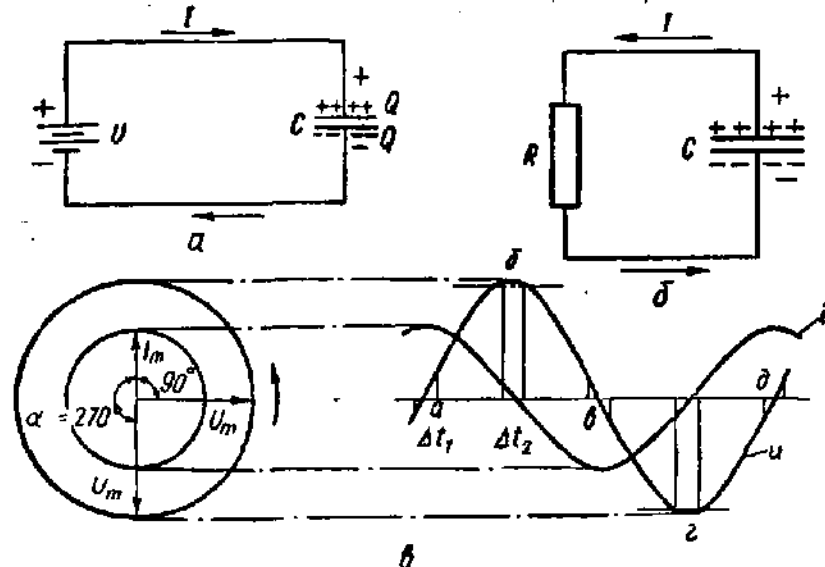


Рис. 39. Електричне коло з конденсатором: а — зарядження конденсатора; б — розрядження конденсатора; в — векторна та часова діаграми напруги та сили струму.

напруги U_m на векторній діаграмі розмістимо горизонтально. Звернемося до формули $Q = CU$ і застосуємо її до розглядуваного випадку зарядження конденсатора змінним струмом. Очевидно, що за дуже короткий проміжок часу Δt напруга на затискачах генератора зміниться незначною мірою — на Δu . За цей же проміжок часу Δt генератор віддасть конденсатору кількість зарядів ΔQ . Отже, ця формула для дуже малого відтинку часу Δt матиме вигляд $\Delta Q = C\Delta u$. Поділивши обидві частини рівності на Δt , дістанемо $\Delta Q/\Delta t = C\Delta u/\Delta t$. Ліва частина цієї рівності являє собою відношення кількості зарядів ΔQ , що перейшли від генератора до конденсатора протягом часу Δt , до цього проміжку часу. Якщо ΔQ виразити в кулонах, а Δt — в секундах, то відношення $\Delta Q/\Delta t$ являтиме собою кількість зарядів у кулонах, перенесених за одну секунду, тобто буде миттєвим значенням струму i в амперах. Отже, останню рівність можна записати у вигляді $i = C\Delta u/\Delta t$.

Якщо напруга синусоїдна ($u = U_m \sin \omega t$), то за час Δt вона зміниться на $\Delta u = U_m [\sin \omega(t + \Delta t) - \sin \omega t]$. У цьому виразі $\sin \omega(t + \Delta t) = \sin \omega t \cos \omega \Delta t + \cos \omega t \sin \omega \Delta t$, і оскільки кут $\omega \Delta t$ дуже малий, то його синус дорівнює дузі, а косинус — одиниці ($\sin \omega \Delta t = \omega \Delta t$; $\cos \omega \Delta t = 1$). На основі чого $\Delta u = U_m (\sin \omega t + \omega \Delta t \cos \omega t - \sin \omega t)$ і $\Delta u/\Delta t = U_m \omega \cos \omega t$. Отже, через конденсатор

протікає змінний струм $i = C \Delta u / \Delta t = U_m \omega C \cos \omega t = U_m \omega C \sin \times (\omega t + \pi/2)$, тобто струм синусоїдний і випереджає за фазою прикладену напругу на чверть періоду ($\pi/2 = 90^\circ$).

Максимальне значення сили змінного струму, що протікає через конденсатор, $I_m = U_m \omega C$, діюче значення сили струму в колі з конденсатором $I = \omega C U_m / \sqrt{2} = \omega C U = U / (1/\omega C)$.

Ця формула виражає закон Ома для кола змінного струму з конденсатором. Відношення $1/(\omega C)$ називається ємнісним опором, позначається X_C і вимірюється в омах; $X_C = 1/(\omega C)$.

§ 35. КОЛО ЗМІННОГО СТРУМУ З АКТИВНИМ І ЄМНІСНИМ ОПОРАМИ

Припустимо, що в колі (рис. 40, а) з активним опором R та конденсатором ємністю C протікає змінний струм з кутовою частотою ω і діючою силою I . Нехай початкова фаза сили струму дорівнює нулеві і сила струму зображується вектором I (рис. 40, б), розміщеним гори-

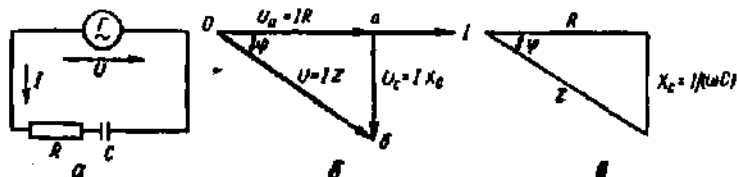


Рис. 40. Активний опір і конденсатор у колі змінного струму:

а — схема; б — векторна діаграма напруги й сили струму; в — трикутник опорів.

зонтально. Струм силою I , проходячи через активний опір R , утворює спад напруги $U_a = IR$, яка збігається за фазою з силою струму. Вектор напруги U_a , як відомо, називається активним спадом напруги.

Оскільки розглядуване коло, крім активного опору, має ще й ємнісний опір $X_C = 1/(\omega C)$, то струм силою I , проходячи через конденсатор з опором X_C , створює ще напругу $U_c = IX_C$, яка називається ємнісним спадом напруги. Як відомо, напруга на конденсаторі відстає за фазою від сили струму на кут 90° . Тому на векторній діаграмі вектор напруги U_c побудований під кутом 90° у бік відставання (за годинниковою стрілкою). Отже, напруга на затискачах кола має дорівнювати геометричній сумі векторів U_a та U_c . В результаті геометричного додавання цих векторів матимемо вектор U , який своєю величиною та напрямком визначає діюче значення напруги.

Вектор I випереджає вектор U на лівий кут φ . Крім того, вектор U є гіпотенузою прямокутного трикутника Oab , який називається трикутником напруг. Катет трикутника $Oa = U_a = IR$, а

катет $ab = U_c = IX_C$, тобто $U^2 = U_a^2 + U_c^2$ або $U^2 = (IR)^2 + (IX_C)^2 = I^2 (R^2 + X_C^2)$. Добуваючи квадратний корінь з обох частин останнього рівняння, дістаємо $U = I \sqrt{R^2 + X_C^2}$, звідки $I = U / \sqrt{R^2 + X_C^2}$.

Остання формула виражає закон Ома для кола змінного струму з активним та ємнісним опорами. Знаменник цього виразу, позначений літерою Z , називається повним опором кола:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}$$

Грунтуючись на цьому рівнянні, можемо побудувати прямокутний трикутник (рис. 40, в) з катетами R та $X_C = 1/(\omega C)$ і гіпотенузою Z , який називається трикутником опорів кола з активним та ємнісним опорами. З трикутника опорів можна визначити кут зсуву фаз φ між силою струму в колі та напругою, прикладеною до нього: $\cos \varphi = R/Z = R / \sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}$.

§ 36. КОЛО ЗМІННОГО СТРУМУ З АКТИВНИМ, ІНДУКТИВНИМ ТА ЄМНІСНИМ ОПОРАМИ

Розглянемо коло змінного струму, що складається із з'єднаних послідовно активного опору R , котушки індуктивності L та конденсатора ємністю C (рис. 41, а). Під дією прикладеної напруги U проті-

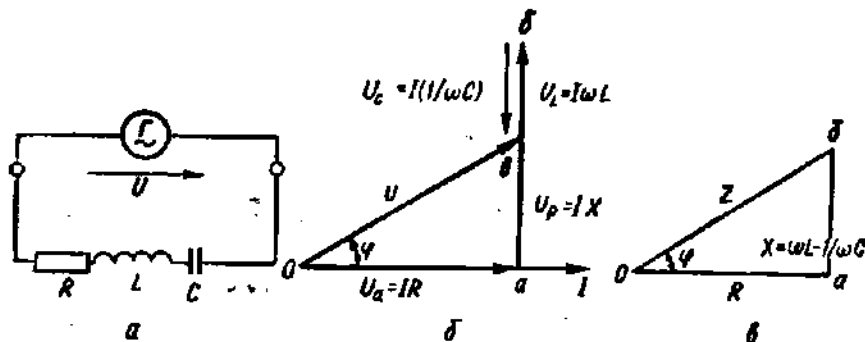


Рис. 41. Активний опір, котушка індуктивності та конденсатор у колі змінного струму:

а — схема; б — векторна діаграма; в — трикутник опорів.

кає струм силою I . Напруга U має компенсувати спад напруги на активному опорі $U_a = IR$, на індуктивному опорі $U_L = I\omega L$ та ємнісному опорі $U_c = I/(\omega C)$.

Побудуємо векторну діаграму для цих напруг (рис. 41, б). Відкладемо силу струму I у вигляді горизонтального відрізка і за його

напрямок відкладемо активну складову напруги $U_a = IR$, маючи на увазі, що вона збігається за фазою з силою струму. Оскільки індуктивна складова напруги U_L випереджає силу струму I за фазою на кут 90° , поставимо до напрямку сили струму перпендикуляр і відкладемо на ньому індуктивний спад напруги $U_L = I\omega L$ у вигляді відрізка ab . Ємнісний спад напруги U_C відстає від сили струму I за фазою на кут 90° , тому з кінця відрізка ab (з точки b) опустимо до напрямку сили струму перпендикуляр і на ньому відкладемо $U_C = I(1/\omega C)$ у вигляді відрізка bc . Тепер, з'єднавши точки O та a , матимемо сумарний вектор Oa , який своєю величиною й напрямком визначить напругу U , прикладену до кінців розглядуваного кола.

Прямокутний трикутник Oab називається трикутником напруги для кола з послідовно з'єднаними активним, індуктивним та ємнісним опором. Катет ab являє собою різницю між індуктивним U_L та ємнісним U_C спадами напруг. Отже, можемо записати рівність $U^2 = U_a^2 + (U_L - U_C)^2 = I^2 [R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2]$, звідки

$$U = I\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}, \quad I = U/\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}.$$

Остання формула виражає закон Ома для кола змінного струму з активним, індуктивним та ємнісним опором. Знаменник у ній позначається літерою Z і називається повним опором кола:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}.$$

Грунтуючись на цьому рівнянні, побудуємо прямокутний трикутник Oab (рис. 41, *в*) з катетами R та $\omega L - 1/\omega C$ і гіпотенузою Z , який називається трикутником опорів кола з активним, індуктивним та ємнісним опором. З трикутника опорів можна визначити кут зсуву фаз між напругою й силою струму в колі:

$$\cos \varphi = R/Z = R/\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}.$$

Розглянемо окремий випадок послідовного з'єднання активного, індуктивного та ємнісного опорів, коли різниця між індуктивним та ємнісним опором дорівнює нулеві, тобто $X_L - X_C = \omega L - 1/\omega C = 0$ або $\omega L = 1/\omega C$.

Розв'язавши рівняння відносно кутової частоти ω , яку для цього випадку позначимо ω_0 , дістанемо $\omega_0^2 LC = 1$ або $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. Кут частота ω_0 називається резонансною кутовою частотою. За цієї частоти сила струму в колі обумовлюється самим лише активним опором R , тобто $I = U/R$ і досягає найбільшого значення. Кут зсуву фаз між напругою та силою струму при резонансі дорівнює нулеві, оскільки $\cos \varphi = 1$, а саме $\cos \varphi = R/Z = 1$.

Розглянутий нами випадок називається резонансом напруг, бо при цьому напруги на затискачах конденсатора U_C та індуктивного опору U_L можуть значно перевищувати напругу, прикладену до кола. Напруги U_L та U_C однакові і зсунуті за фазою на полови-

ну періоду, тобто в будь-який момент часу вони однакові і протилежні за знаком. Отже, в будь-який момент часу миттєві потужності в реактивних ділянках однакові і протилежні за знаком, тобто збільшення енергії магнітного поля в котушці індуктивності відбувається внаслідок зменшення електричної енергії, що є в конденсаторі, а генератор витрачає енергію на активний опір.

§ 37. ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ РЕАКТИВНИХ ОПОРІВ. РЕЗОНАНС СТРУМІВ

Припустимо, що два паралельні відгалуження приєднані до затискачів генератора змінного струму (рис. 42, *а*) з напругою U . Одне відгалуження має активний опір R_1 та індуктивність L_1 , друге — відповідно R_2 та L_2 .

Якщо кутова частота генератора $\omega = 2\pi f$, то повні опори Z_1 і Z_2 першого та другого відгалужень дорівнюють:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2};$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}.$$

Сили струмів I_1 та I_2 відповідно до закону Ома визначаються з виразів

$$I_1 = U/\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}; \quad I_2 = U/\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}.$$

Оскільки в кожному відгалуженні, крім активних опорів, є й індуктивні, то сили струмів у відгалуженнях відстають за фазою від напруги U на кути φ_1 та φ_2 , які визначаються з рівностей $\cos \varphi_1 = R_1/Z_1$ та $\cos \varphi_2 = R_2/Z_2$.

Відповідно до цього на рис. 42, *б* побудовано векторну діаграму, на якій напругу U показано у вигляді відрізка Oa , а сили струмів I_1 та I_2 — у вигляді відрізків Ob та Oz .

Сила струму в нерозгалуженій частині кола являє собою геометричну суму сил струмів I_1 та I_2 . Тому для визначення сили струму I на діаграмі сили струмів I_1 та I_2 додані геометрично. В результаті додавання одержали вектор сили струму у вигляді відрізка Oz , який своєю величиною й напрямком обумовлює величину й напрямок струму I в нерозгалуженій частині кола. Кут φ є кутом зсуву фаз між напругою U та силою струму I .

Силу струму I та кут зсуву фаз φ можна вирахувати. Для цього кожен силу струму I_1 та I_2 розкладають на дві складові, одна з яких

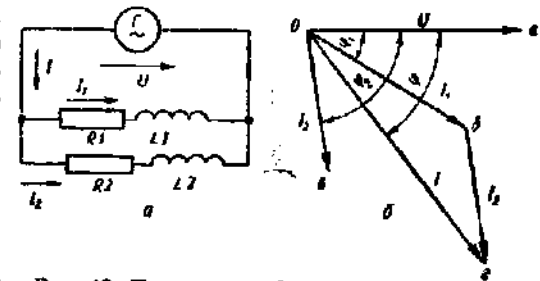


Рис. 42. Паралельне з'єднання опорів:
а — схема; б — векторна діаграма.

спрямована за вектором напруги U (рис. 43), а друга — перпендикулярно до першої. Першу складову називають активною складовою сили струму, другу — реактивною складовою сили струму. Позначивши складові сили струму I_1 — активну I_{1a} та реактивну I_{1p} , а складові сили струму I_2 — активну I_{2a} та реактивну I_{2p} , запишемо: $I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1$; $I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1$; $I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2$; $I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2$.

Сила струму в нерозгалуженій частині кола $I = \sqrt{(I_{1a} + I_{2a})^2 + (I_{1p} + I_{2p})^2} = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$, де $I_a = I_{1a} + I_{2a}$; $I_p = I_{1p} + I_{2p}$; I_a та I_p — відповідно активна та реактивна складові сили струму I в нерозгалуженій частині кола.

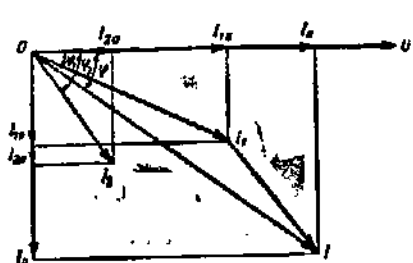


Рис. 43. Активні та реактивні складові сили струму.

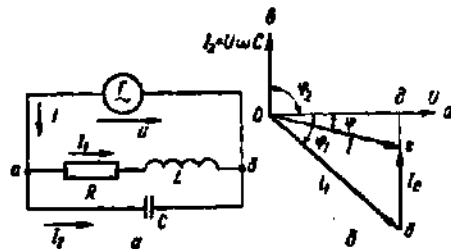


Рис. 44. Паралельне з'єднання котушки індуктивності та конденсатора: а — схема; б — векторна діаграма.

I_p — відповідно активна та реактивна складові сили струму I в нерозгалуженій частині кола.

Косинус кута зсуву фаз φ між напругою U та силою струму I визначається з рівності $\cos \varphi = I_a/I$.

Розглянемо дуже важливий випадок паралельного з'єднання двох відгалужень, коли в одному з них є активний опір R та котушка індуктивності L , а у другому — конденсатор ємністю C (рис. 44, а). Напруга генератора G , прикладена до точок a і b , дорівнює U при кутовій частоті ω . Очевидно, що у відгалуженні з котушкою індуктивності сила струму $I_1 = U/\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ і відстає за фазою від напруги U на кут φ_1 . У відгалуженні з конденсатором сила струму $I_2 = U/1/\omega C = U\omega C$. Оскільки у відгалуженні з конденсатором немає активного опору, то сила струму I_2 випереджає напругу U за фазою на кут 90° , що зображено на векторній діаграмі (рис. 44, б). На горизонтальній осі відкладено напругу U вигляді відрізка Oa . Під кутом φ_1 у бік відставання (за годинниковою стрілкою) від напруги U побудуємо відрізок Ob , на якому відкладемо силу струму I_1 . Далі під кутом $\varphi_2 = 90^\circ$ у бік випередження (проти годинникової стрілки) від напруги U побудуємо відрізок Ov і на ньому відкладемо силу струму I_2 . Геометрично додавши вектори сил струму I_1 та I_2 , дістанемо вектор сили струму I в нерозгалуженій частині кола. Відрізок Oz визна-

чає силу струму I , а кут φ — кут зсуву фаз між напругою U та силою струму I в нерозгалуженій частині кола.

З цієї діаграми видно, що якби не було відгалуження з конденсатором C , приєднаного паралельно відгалуженню з активним опором R та котушкою індуктивності L , то сила струму в колі дорівнювала б I_1 . Наявність же конденсатора знизила силу струму в нерозгалуженій частині кола до $I < I_1$. Якщо підібрати ємність C так, щоб $Ov = bd$, тобто щоб $U\omega C = I_1 \sin \varphi_1$, то сила струму I в нерозгалуженій частині кола досягне мінімального значення, а кут φ дорівнюватиме нулеві. Такий випадок називається резонансом струмів.

Через те що в разі резонансу струмів у нерозгалуженій частині кола сила струму має мінімальне значення, втрати в з'єднувальних проводах та в обмотках генераторів змінного струму також мінімальні. Приєднання конденсатора паралельно колу з активним та індуктивним опорами підвищує $\cos \varphi$.

За паралельного з'єднання конденсатора ємністю C та котушки індуктивності L з малим активним опором, яким можна знехтувати ($R = 0$), сили струму у відгалуженнях визначатимуться за такими формулами: у відгалуженні з індуктивністю — $I_L = U/\omega L$; у відгалуженні з конденсатором — $I_C = \omega CU$.

Підберемо індуктивність L та ємність C такими, щоб сили струмів I_L та I_C були однакові, тобто щоб $U/\omega L = U\omega C$. Звідси визначаємо: резонансну кутову частоту $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ і резонансну частоту $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$.

У відгалуженні з конденсатором сила струму I_C випереджає напругу U за фазою на кут 90° , а у відгалуженні з котушкою індуктивності сила струму I_L відстає від напруги U за фазою на кут 90° . Сила струму I в нерозгалуженій частині кола дорівнює нулеві, оскільки сили струмів I_C та I_L , однакові за значенням, спрямовані в протилежних напрямках. За ідеального резонансу сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює нулеві. У цьому разі вхідний опір кола, що складається з паралельно з'єднаних котушки індуктивності та конденсатора, має безкінечно велике значення.

Якщо конденсатор зарядити до деякої напруги U й замкнути на індуктивну котушку (рис. 45, а), то у замкненому контурі виникне струм і конденсатор розряджатиметься через котушку. При цьому електрична енергія, що є в запасі у конденсаторі, переходиме в енергію магнітного поля котушки. У початковий момент, коли напруга на конденсаторі велика, сила струму й магнітне поле котушки швидко зростають. У котушці виникає ЕРС самоіндукції E_L , яка зрівноважує напругу U на конденсаторі. У процесі розрядження конденсатора напруга на ньому знижується і в момент, коли вона зменшиться до нуля, сила струму в контурі досягне максимального значення, тобто магнітне поле котушки стане найбільшим. Потім сила струму в колі

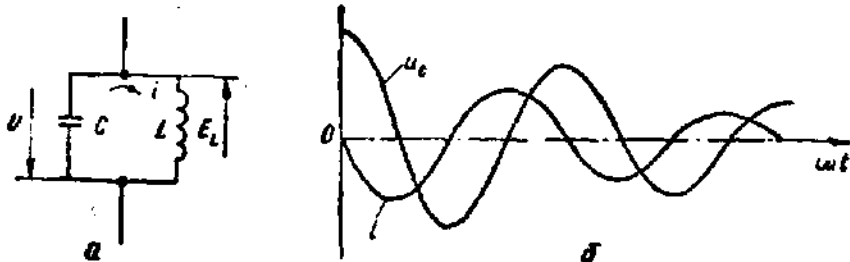


Рис. 45. Коливальний контур:
а — схема; б — часові діаграма.

почне зменшуватися й ЕРС самоіндукції, змінивши напрямок, заряджатиме конденсатор (з протилежною полярністю) до найбільшого значення ЕРС самоіндукції, яке відповідає моменту, коли сила струму зменшиться до нуля. При цьому енергія магнітного поля котушки знову повертається конденсатору. Після цього почнеться розрядження конденсатора, але напрямок сили струму розрядження буде протилежний початковому, через те що напруга на конденсаторі змінила полярність.

Отже, в колі відбувається процес періодичної зміни сили струму й напруги з резонансною частотою $f_0 = 1/2\pi \sqrt{LC}$ (рис. 45, б). Таке коло називається коливальним контуром.

Сила струму в контурі і напруга на ньому з часом зменшуються, бо крім реактивних опорів у колі є й активний опір проводу, який є обмоткою індуктивної котушки. В активному опорі проводу виділяється енергія, яка перетворюється в теплоту й нагріває провід. Тому енергія, яка є в конденсаторі і переходить в енергію магнітного поля індуктивної котушки, а потім знову в конденсатор, з кожним періодом поступово зменшується, що призводить до затухання коливань.

§ 36. ПОТУЖНІСТЬ ЗМІННОГО СТРУМУ

Як відомо, потужність постійного струму є добутком напруги на силу струму. У разі змінного струму і напруга і сила струму періодично змінюються в часі. Отже, в будь-який момент потужність, яка дорівнює добуткові миттєвих значень напруги на силу струму ($p = ui$), є також змінною величиною.

За активного навантаження, коли немає зсуву фаз між напругою та силою струму ($\varphi = 0$ або $\cos \varphi = 1$), потужність є добутком діючих значень напруги на силу струму і вимірюється у ватах (або кіловатах, мегаватах тощо), тобто $P = UI$.

У колі з активним опором та котушкою індуктивності сила струму відстає за фазою від напруги на кут φ (рис. 46) і миттєві значення по-

тужності виходить як додатним, так і від'ємним, тобто навантаження споживає енергію протягом однієї частини періоду й повертає її в мережу протягом другої частини. Потужність змінного струму можна подати у вигляді активної та реактивної потужності. Активна потужність споживається активним опором, де відбувається перетворення електричної енергії в енергію іншого виду (механічну, світлову, теплову і т. д.).

Активна потужність $P = I^2 R$. Оскільки $IR = U_a = U \cos \varphi$, то $P = UI \cos \varphi$, де U та I — діючі значення напруги й сили струму, U_a — спад напруги на активному опорі.

Реактивна потужність накопичується котушкою індуктивності при зростанні сили струму в колі у вигляді магнітного поля. Під час зменшення сили струму в колі енергія, накопичена в магнітному полі, перетворюється в електричну і повертається джерелу енергії. Добуток діючих значень U, I та $\sin \varphi$ називають реактивною потужністю: $Q = UI \sin \varphi = U_L I = I^2 X_L$. Вона вимірюється в вольт-амперах (або кіловольт-амперах) реактивних (вар або квар). Реактивна потужність не споживається приймачем енергії і не бере участі в процесі перетворення електричної енергії в енергію іншого виду. Ця потужність циркулює між джерелом і приймачем енергії, навантажуючи проводи їхніх обмоток і ліній, що з'єднують приймач енергії зі джерелом, а також збільшуючи втрати енергії в них.

Добуток діючих значень напруги на силу струму називається повною потужністю S , що вимірюється в вольт-амперах або кіловольт-амперах ($V \cdot A$ або $kV \cdot A$), тобто

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Габарити електричних апаратів і машин обумовлюються повною потужністю, оскільки площа перерізу проводів обмотки залежить від сили струму, що протікає через них, а ізоляція струмопровідних частин — від напруги, під якою вони перебувають.

Відношення активної потужності до повної $P/S = \cos \varphi$ показує, яка частка повної потужності споживається електричним колом, і називається коефіцієнтом потужності, який дорівнює косинусу кута зсуву фаз між напругою й силою струму. У разі активного навантаження $\cos \varphi = 1$ і $S = P$, тобто електричний апарат чи машина мають найбільшу активну потужність.

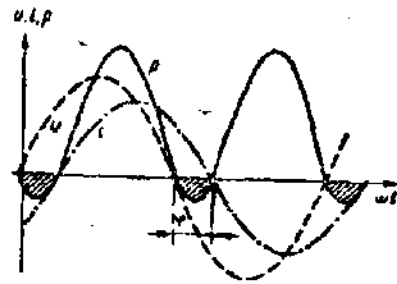


Рис. 46. Графік миттєвих значень напруги, сили струму та потужності.

Вище розглянуто властивості однофазного змінного струму. Проте однофазна система нееконіомічна через недоскопалість однофазних електричних машин. Наприклад, за однакових габаритів, мас активних матеріалів (сталі та міді) і втрат енергії потужність однофазної машини в 1,5 раза менша від потужності трифазної машини. Тому для електрифікації використовують трифазну систему змінного струму.

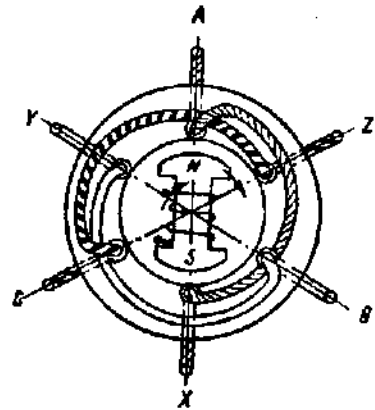


Рис. 47. Схема будови трифазного генератора.

На рис. 47 показано схему будови найпростішого двополюсного трифазного генератора. У пазах статора (нерухома частина машини) розміщені котушки $A - X$, $B - Y$ та $C - Z$, зсунені у просторі на одну третину довжини кола (на 120°). Всередині статора розміщено ротор (обертову частину машини) — двополюсний електромагніт, що живиться постійним струмом, який збуджує магнітне поле. Ротор обертається від будь-якого двигуна. Магнітні лінії, обертаючись разом з ротором, перетинають провідники котушок, закладених у пази статора, й індукують у цих котушках електрорушійні сили, які змінюються синусоїдно. Проте синусоїди ЕРС фаз e_A , e_B та e_C будуть зміщені одна відносно одної на третину періоду.

Нехай додатний максимум електрорушійної сили E_m у котушці $A - X$ наступає в той момент, коли бік A знаходиться напроти центра північного полюса, а бік X — напроти центра південного полюса. Додатний максимум ЕРС E_m у котушці $B - Y$ наступить у той момент, коли центр північного полюса буде під провідником B . Для цього ротор має повернутися на третину довжини кола (на 120°), що відповідає відтинку часу, який дорівнює третині періоду. Додатний максимум ЕРС E_m у котушці $C - Z$ наступить через третину періоду

після такого ж максимуму в котушці $B - Y$, що відповідає дальшому повертанню ротора на третину довжини кола.

На рис. 48 показано криві зміни ЕРС у котушках $A - X$, $B - Y$ та $C - Z$ і положення ротора, які відповідають додатному максимуму ЕРС E_m у цих котушках.

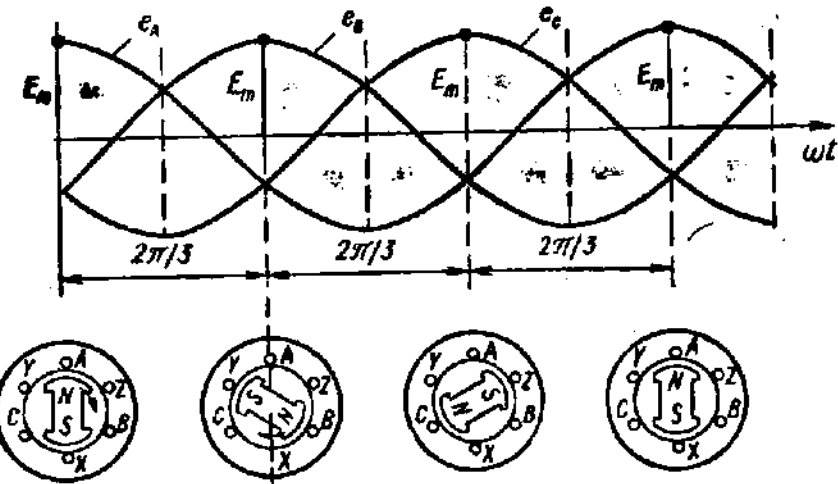


Рис. 48. Криві зміни ЕРС у трифазній обмотці генератора.

Якщо генератор навантажений, на затискачах котушок $A - X$, $B - Y$ та $C - Z$ установлюються напруги, які називаються фазними. У разі відсутності навантаження (холостий хід) фазні напруги дорівнюють ЕРС, що індукуються в котушках статора.

§ 40. З'ЄДНАННЯ ОБМОТОК ГЕНЕРАТОРА

У трифазному генераторі електрорушійні сили трьох незалежних однофазних кіл однакові за амплітудою і зміщені за фазою на третину періоду. До кожної пари затискачів обмотки статора можна приєднати проводи, що підводять струм до навантаження, й одержати нез'язану трифазну систему (рис. 49, а). Проте всі три фази вигідніше об'єднати в одну загальну трифазну систему. Для цього обмотки генератора з'єднують між собою зіркою або трикутником.

У разі з'єднання обмоток генератора зіркою (рис. 49, б) кінці трьох фаз з'єднують у спільній точці O , а до початків фаз приєднують проводи, які відводять електричну енергію в мережу. Ці три проводи називаються лінійними, а напруга між будь-якими двома лінійними проводами — лінійною напругою U_L . Від спільної точки з'єднання кінців (або початків) трьох фаз (від нульової точки

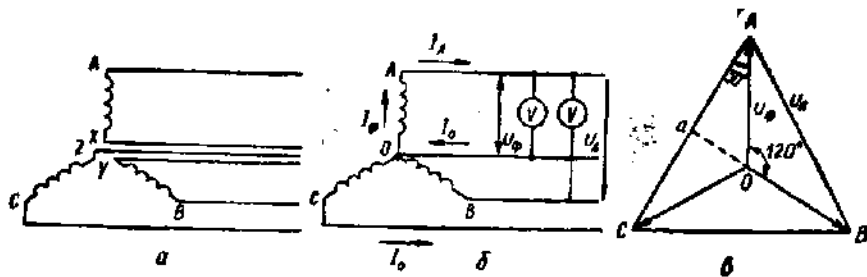


Рис. 49. Схема з'єднання обмоток трифазного генератора: а — незалежної системи; б — зіркою; в — векторні діаграми напруг.

зірки) можна відвести четвертий провідник, який називається нульовим. Напряга між будь-яким лінійним провідником і нульовим дорівнює напрузі між початком і кінцем однієї фази, тобто фазній напрузі U_ϕ .

Усі фази обмотки генератора виконують однаковими, отже, діючі значення ЕРС у фазах однакові, тобто $E_A = E_B = E_C$. Якщо в коло кожної фази генератора ввести навантаження, то через ці кола протікатимуть струми. У разі однакового за значенням і характером опору всіх трьох фаз приймача, тобто при рівномірному навантаженні, сили струмів у фазах будуть однакові за значенням і зміщені за фазою відносно своїх напруг на той самий кут φ .

Максимальні й діючі значення фазних напруг за рівномірного навантаження однакові, тобто $U_A = U_B = U_C$. Ці напруги зсунуті за фазою на 120° , як показано на векторній діаграмі (рис. 49, в). Напруги між будь-якими точками схеми (див. рис. 49, б) відповідають векторам (див. рис. 49, в) між тими самими точками. Наприклад, напруга між точками А і О схеми (фазна напруга U_A) відповідає вектору $A-O$ діаграми, а напруга між лінійними провідниками А і В схеми — вектору лінійної напруги А — В діаграми. За векторною діаграмою легко визначити співвідношення між лінійними та фазними напругами. З трикутника AOa можна записати такі співвідношення: $U_A/2 = U_\phi \cos 30^\circ = U_\phi \sqrt{3}/2$, звідки $U_A = \sqrt{3} U_\phi$ або $U_\phi = U_A/\sqrt{3}$, тобто у разі з'єднання обмотки генератора зіркою лінійна напруга в $\sqrt{3} = 1,73$ разів більша від фазної (за рівномірного навантаження).

Зі схеми (див. рис. 49, б) видно, що в разі з'єднання обмоток генератора зіркою сила струму в лінійному провіді дорівнює силі струму у фазі генератора: $I_\lambda = I_\phi$. Згідно з першим законом Кірхгофа можна записати, що сила струму в нульовому провіді дорівнює геометричній сумі сил струмів у фазах генератора.

За симетричного навантаження сили струмів у фазах генератора однакові між собою і зсунуті за фазою на третину періоду. Геометрич-

на сума сил струмів трьох фаз у цьому випадку дорівнює нулеві, тобто у нульовому провіді струм відсутній. Тому за симетричного навантаження нульового провода може й не бути. У разі несиметричного навантаження сила струму в нульовому провіді не дорівнює нулеві. Площа поперечного перерізу нульового проводу завжди менша, ніж лінійних проводів.

Якщо обмотки генератора з'єднані трикутником (рис. 50, а), то початок однієї фази з'єднується з кінцем другої. Отже, три фази ге-

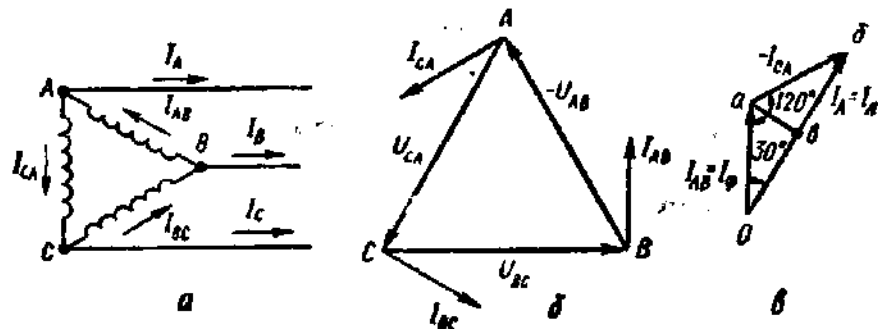


Рис. 50. Схема з'єднання обмоток генератора трикутником (а), векторні діаграми напруг і сил струмів у фазах (б) та векторна діаграма сил фазних і лінійних струмів (в).

ратора утворюють замкнений контур, у якому діє ЕРС, що дорівнює геометричній сумі ЕРС, індукованих у фазах генератора. Оскільки ЕРС у фазах генератора однакові і зсунуті на третину періоду за фазою, то їхня геометрична сума дорівнює нулеві, отже, у замкненому контурі трифазної системи, з'єднаної трикутником, за відсутності зовнішнього навантаження струму не буде.

У разі з'єднання трикутником лінійні проводи приєднуються до точок з'єднання початку однієї фази і кінця іншої. Напруга між лінійними проводами дорівнює напрузі між початком і кінцем однієї фази. Отже, в разі з'єднання обмоток генератора трикутником лінійна напруга дорівнює фазній: $U_\lambda = U_\phi$.

За рівномірного навантаження у фазах обмоток генератора проходять струми однакової сили: $I_{AB} = I_{BC} = I_{CA}$. Ці сили струмів зсунуті відносно фазних напруг на однакові кути φ .

На рис. 50, б зображено векторну діаграму, на якій показано вектори фазних напруг і сил струмів. Зі схеми видно, що сили лінійних струмів не дорівнюють силам фазних струмів. Якщо прийняти напрямки фазних і лінійних струмів, показаний на рис. 50, а, за додатний, то згідно з першим законом Кірхгофа для миттєвих значень сил струмів можна записати такі вирази:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}; \quad I_B = I_{BC} - I_{AB}; \quad I_C = I_{CA} - I_{BC}.$$

чів з'єднують трикутником так, щоб вони були ввімкнені тільки між лінійними проводами і перебували під лінійною напругою, яка в $\sqrt{3}$ разів більша від фазної.

Чотирипровідна система широко використовується для електропостачання змішаних освітлювально-силових навантажень. Освітлювальні навантаження вмикають на фазну напругу, а силові (електродвигуни) — на лінійну.

Для трифазних систем справедливі співвідношення, виведені для однофазного змінного струму: $I_\phi = U_\phi / Z_\phi$; $\cos \varphi = R_\phi / Z_\phi$, де U_ϕ , Z_ϕ та R_ϕ — відповідно напруга, повний та активний спори розглядуваної фази.

§ 42. ПОТУЖНІСТЬ ТРИФАЗНОГО СТРУМУ

Потужність, яку споживає навантаження від мережі трифазного струму, дорівнює сумі потужностей в окремих фазах: $P = P_A + P_B + P_C$.

У разі рівномірного навантаження потужність, яку споживає кожна фаза, $P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi$, де U_ϕ — фазна напруга; I_ϕ — сила фазного струму; $\cos \varphi$ — коефіцієнт потужності навантаження.

Потужність, споживана трьома фазами,

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi.$$

Якщо приймачі енергії з'єднані зіркою, співвідношення між лінійними та фазними напругами й силами струмів такі: $U_\Delta = \sqrt{3}U_\phi$; $I_\Delta = I_\phi$. Звідси потужність, споживана навантаженням від трифазної мережі,

$$P = \sqrt{3}U_\Delta I_\Delta \cos \varphi.$$

У разі з'єднання приймачів енергії трикутником співвідношення між лінійними та фазними напругами й силами струмів будуть такими: $U_\Delta = U_\phi$, $I_\Delta = \sqrt{3}I_\phi$. Звідси потужність, споживана навантаженням,

$$P = \sqrt{3}U_\Delta I_\Delta \cos \varphi.$$

Отже, в разі рівномірного навантаження потужність, яка споживається від трифазної мережі, незалежно від способу ввімкнення навантаження виражається формулою $P = \sqrt{3}U_\Delta I_\Delta \cos \varphi$. При цьому джерело електричної енергії, яке живить споживачів, має бути розраховане на повну потужність: $S = \sqrt{3}U_\Delta I_\Delta$.

Для вимірювання потужності застосовують спеціальні вимірювальні прилади — ватметри. Якщо навантаження симетричне, або рівномірне, то потужність, яка споживається від трифазної системи, можна визначити одним однофазним ватметром. У чотирипровідній системі (з нульовим проводом) струмова обмотка ватметра вмик-

Рис. 54. Вимірювання потужності у трифазній системі:

а — у чотирипровідній мережі за рівномірного навантаження; б — у трипровідній мережі за нерівномірного навантаження.

ється послідовно в один із лінійних проводів, а обмотка напруги — між тим самим лінійним і нульовим проводами (рис. 54, а). За такого ввімкнення ватметр показує потужність в одній фазі P_ϕ , а оскільки при рівномірному навантаженні потужності фаз однакові, то сумарна потужність трифазної системи $P = 3P_\phi$.

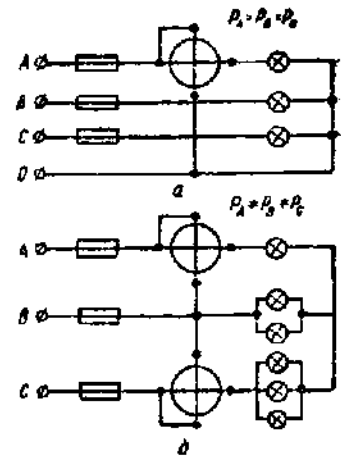
У трипровідній системі коло напруги ватметра ввімкнено на лінійну напругу мережі, а по його струмовій обмотці протікає лінійний струм. Тому потужність трифазної системи в $\sqrt{3}$ разів більша від показів ватметра P_W , тобто $P = \sqrt{3}P_W$.

У разі несиметричного навантаження недостатньо одного ватметра для визначення потужності трифазної системи. У чотирипровідній системі треба застосовувати три ватметри, обмотки напруги яких вмикаються між нульовим і відповідним лінійним проводами. Кожен ватметр вимірює потужність однієї фази. Потужність трифазної системи дорівнює сумі показів трьох ватметрів: $P = P_1 + P_2 + P_3$. У трипровідній системі за несиметричного навантаження найчастіше використовується схема двох ватметрів (рис. 54, б), яку не можна застосовувати у чотирипровідній системі. У схемі двох ватметрів обмотки напруги кожного ватметра з'єднані з вхідним затискачем струмової обмотки та лінійним проводом, що залишився вільним. Повна потужність трифазної системи дорівнює сумі показів ватметрів: $P = P_1 + P_2$.

У лабораторній практиці для цієї схеми вимірювання потужності застосовують один ватметр і спеціальний перемикач, який без розриву струмового кола дає змогу вмикати ватметр в один і в другий лінійні проводи.

Якщо кут зсуву фаз між напругою й силою струму великий, то покази ватметра в одній із фаз можуть бути від'ємними, і для вимірювання потужності треба буде змінити напрямок струму у струмовій обмотці, перемкнувши її. У цьому випадку сумарна потужність дорівнюватиме різниці між показами ватметрів: $P = P_1 - P_2$.

Енергія у трифазній системі вимірюється одно- і трифазними лічильниками електричної енергії. Однофазні лічильники вмикають у трифазну мережу так само, як і ватметри. Трифазні лічильники збирають в одному корпусі з двох чи трьох однофазних зі спільним лічильним



механізмом. Називають їх відповідно дво- чи триелементними. У трипровідній системі (без нульового проводу) застосовують двелементні лічильники, а в чотирьохпровідній системі (з нульовим проводом) — триелементні. Схему вмикання лічильника електричної енергії показано на змінній кришці, якою закривається панель затискачів.

§ 43. ОБЕРТОВЕ МАГНІТНЕ ПОЛЕ

Робота багатофазної машини змінного струму ґрунтується на використанні обертового магнітного поля. Обертове магнітне поле створює будь-яка багатофазна система змінного струму, тобто система з кількістю фаз дві, три і т. д.

Вище зазначалося, що найбільшого поширення набув трифазний змінний струм. Тому розглянемо обертове магнітне поле трифазної системи машини змінного струму. На рис. 55, а показано найпрості-

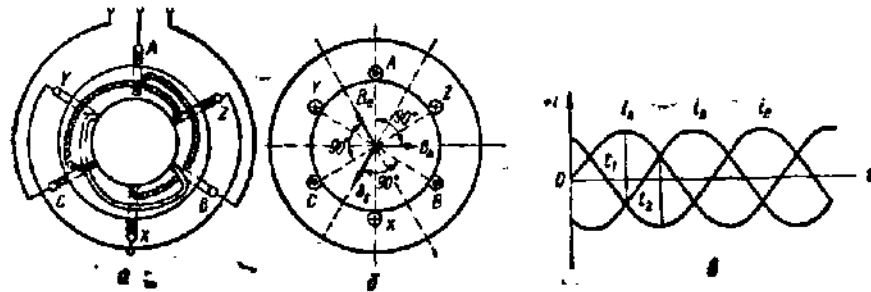


Рис. 55. Найпростіша трифазна обмотка: а — схема; б — розріз; в — криві змінної сили струмів у фазах.

шу трифазну систему, ввімкнену в мережу трифазного струму. У статорі, зібраному з листової сталі, як це робиться у всіх машинах змінного струму, розміщено три котушки, осі яких зсунуті взаємно на кут 120° . Кожну котушку для наочності зображено такою, що складається з одного витка, розміщеного у двох пазах (западинах) статора. Насправді котушки мають більшу кількість витків. Літерами A, B, C позначено початки обмоток, а літерами X, Y, Z — їхні кінці. Фази з'єднуються зіркою або трикутником.

По обмотках протікають синусоїдні струми з однаковими амплітудами їхніх сил (I_m) і з однаковою кутовою частотою ($\omega = 2\pi f$), фази яких зміщені на третину періоду (рис. 55, в). Струми, що протікають у котушках, збуджують змінні магнітні поля, які пронизують котушки обмотки в напрямку, перпендикулярному до їхніх площин. Отже, середня магнітна лінія, або вісь магнітного поля, створюваного котушкою $A - X$, спрямована під кутом 90° до площини цієї котушки

(рис. 55, б). Напрямки магнітних полів усіх трьох котушок показано векторами B_A, B_B, B_C , зміщеними один відносно одного також на кут 120° .

Умовимося вважати додатними напрямки струмів у котушках від початку до кінця обмотки кожної фази. При цьому у провідниках статора, приєднаних до початкових точок A, B і C , струми будуть спрямовані із-за площини рисунка, а у провідниках, приєднаних до кінцевих точок X, Y, Z , — за площину рисунка. Додатним напрямком струмів відповідатимуть додатні напрямки магнітних полів, які показані на рис. 55, б і визначаються за правилом свердлика.

Напрямок результуючого магнітного поля, утвореного трифазною системою, для різних моментів часу визначимо так. У момент часу $t = 0$ сила струму в котушці $A - X$ дорівнює нулеві, у котушці $B - Y$ — від'ємна, у котушці $C - Z$ — додатна. Отже, в цей момент струму в провідниках A і X немає, у провідниках C і Z він має додатний напрямок, а у провідниках B і Y — від'ємний (рис. 56, а). Іншими сло-

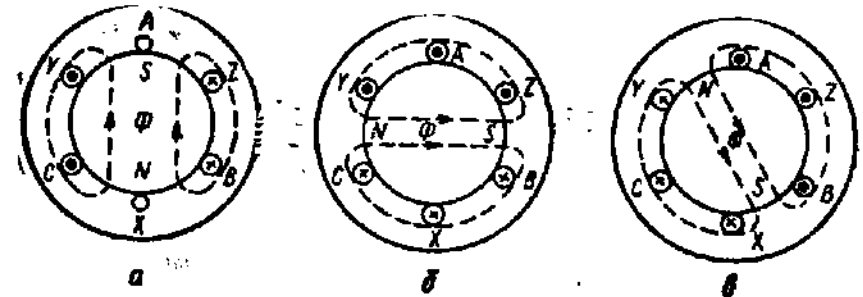


Рис. 56. Магнітне поле трифазної обмотки в різні моменти часу: а — $t = 0$; б — $t = t_1$; в — $t = t_2$.

вами, у вибраний нами момент $t = 0$ у провідниках C і Z струм спрямований на глядача, а у провідниках B і Y — від глядача. За такого напрямку струму, згідно з правилом свердлика, утворене магнітне поле спрямоване знизу вгору, тобто у нижній частині всередині статора знаходиться північний полюс, а у верхній — південний.

У момент t_1 струм у фазі A додатний, у фазах B і C — від'ємний. У провідниках Z, A і Y струми спрямовані на глядача, у провідниках C, X і B — від глядача (рис. 56, б), і магнітне поле повернуто на 90° за годинниковою стрілкою відносно свого початкового напрямку.

У момент t_2 струми у фазах A і B додатні, а у фазі C — від'ємний. У провідниках A, Z і B струми спрямовані на глядача, а у провідниках Y, C і X — від глядача, і магнітне поле повернуто ще на більший кут відносно початкового положення (рис. 56, в).

Отже, з часом відбувається безперервна й рівномірна зміна напрямку магнітного поля, утвореного трифазною обмоткою, тобто магнітне

поле обертається зі сталою швидкістю. У нашому випадку магнітне поле обертається за годинниковою стрілкою.

Якщо поміняти чергування трифазних обмоток, тобто змінити приєднання до мережі будь-яких двох котушок, то зміниться й напрямок обертання магнітного поля. На рис. 57 показано трифазну систему,

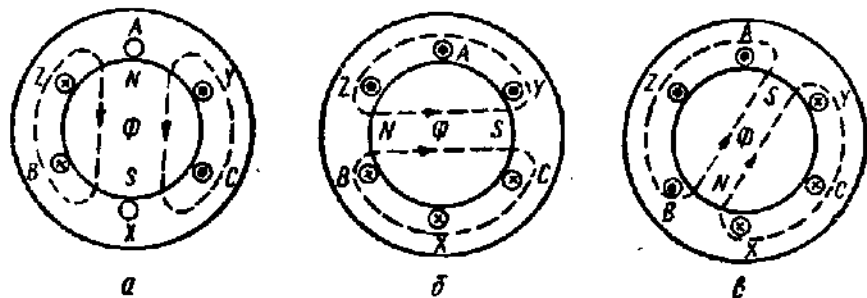


Рис. 57. Магнітне поле трифазної обмотки в різні моменти часу після зміни чергування фаз:

$a - t = 0$; $b - t = t_1$; $c - t = t_2$.

у якій змінено приєднання котушок B і C до мережі. Якщо розглянемо магнітне поле для вибраних до цього моментів часу $t = 0$, $t = t_1$ і $t = t_2$, то побачимо, що магнітне поле обертається тепер проти годинникової стрілки.

Магнітний потік, створюваний трифазною системою змінного струму за симетричного розміщення котушок, є сталим і в будь-який момент часу дорівнює полуторному значенню максимального потоку однієї фази: $\Phi = 1,5\Phi_m$. Це можна довести, визначивши результуючий магнітний потік Φ_p для будь-якого моменту часу. Наприклад, для моменту t_1 , коли $\omega t_1 = 90^\circ$, сили струмів у котушках мають такі значення: $i_A = I_m \sin 90^\circ = I_m$; $i_B = I_m \sin (90^\circ - 120^\circ) = -I_m/2$; $i_C = I_m \sin (90^\circ - 240^\circ) = -I_m/2$. Отже, магнітний потік Φ_A котушки A у вибраний момент має найбільше значення і спрямований по осі цієї котушки у додатному напрямку (рис. 58). Магнітні потоки котушок B і C вдвічі менші від максимального і від'ємні, тобто спрямовані у від'ємному напрямку вздовж осей цих котушок.



Рис. 58. Результуючий магнітний потік трифазної обмотки.

Знайдемо геометричну суму потоків Φ_A , Φ_B і Φ_C . Наприклад, для моменту t_1 результуючий магнітний потік $\Phi_p = \Phi_A + \Phi_B \cos 60^\circ + \Phi_C \cos 60^\circ$, оскільки в цей момент результуючий потік збігається з потоком Φ_A і зміщений відносно потоків Φ_B і Φ_C на 60° . Маючи

на увазі те, що в момент t_1 магнітні потоки котушок набувають значень $\Phi_A = \Phi_m$, $\Phi_B = \Phi_C = \Phi_m/2$, результуючий магнітний потік можна виразити так: $\Phi_p = \Phi_m + 0,5\Phi_m \cos 60^\circ + 0,5\Phi_m \cos 60^\circ = 1,5\Phi_m$.

В момент $t = 0$ результуюче магнітне поле було спрямоване вздовж вертикальної осі (див. рис. 56, а). За час, що дорівнює одному періодові зміни струму в котушках, магнітний потік повернеться на один повний оберт у просторі і знову буде спрямований вздовж вертикальної осі, як і в момент $t = 0$. Якщо частота струму f , тобто струм зазнає f змін за одну секунду, то магнітний потік трифазної обмотки зробить f обертів за секунду або $60f$ обертів за хвилину, тобто $n = 60f$, де n — частота обертання магнітного поля за хвилину. Ми розглянули найпростіший випадок, коли обмотка має одну пару полюсів.

Якщо обмотку статора виконати так, щоб проводи кожної фази були розбиті на 2, 3, 4 і т. д. однакові групи, симетрично розташовані на обводі статора, то кількість пар полюсів буде відповідно 2, 3, 4 і т. д.

На рис. 59 показано обмотку однієї фази, яка складається з трьох симетрично розташованих по обводу статора котушок і утворює шість полюсів або три пари полюсів. У багатополюсних обмотках магнітне поле за один період зміни струму повертається на кут, що відповідає відстані між двома однойменними полюсами. Отже, якщо обмотка має 2, 3, 4 і т. д. пар полюсів, то магнітне поле за один період зміни струму повертається на $1/2$, $1/3$, $1/4$ і т. д. обводу статора. Позначивши літерою p кількість пар полюсів, знайдемо шлях, пройдений полем за один період зміни струму. Цей шлях становитиме $1/p$ обводу статора. Отже, частота обертання магнітного поля за хвилину обернено пропорційна кількості пар полюсів: $n = 60/p$.

Звідси витікає, що частота обертання магнітного поля за хвилину — величина стала й дорівнює частоті струму, помноженій на 60 і поділеній на кількість пар полюсів.

Робота електричних двигунів змінного струму малої потужності, а також вимірювальних приладів індукційної системи (лічильників електричної енергії) ґрунтується на використанні обертового магнітного поля, що збуджується двофазною системою змінного струму (рис. 60). Найпростіша двофазна система складається з двох котушок $A - X$ і $B - Y$, осі яких зміщені у просторі на кут 90° . Якщо через ці котушки, що мають однакову кількість витків, пропустити однакові за силою і зміщені на чверть періоду (90°) синусоїдні струми $i_A = I_m \sin \omega t$; $i_B = I_m \sin (\omega t + 90^\circ) = I_m \cos \omega t$, то магнітні поля, які збуджуються струмами цих котушок, будуть також синусоїдними і зміщеними за фазою на чверть періоду: $B_A = B_m \sin \omega t$; $B_B = B_m \cos \omega t$. При цьому вектор максимуму магнітної індукції B_A спрямований вздовж осі котушки $A - X$, а вектор B_B — вздовж осі котушки $B - Y$. У будь-який момент результуюче магнітне поле

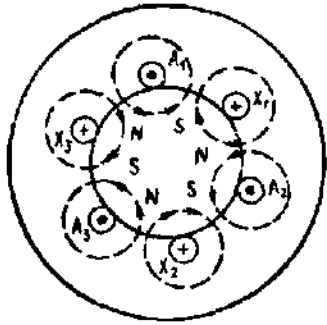


Рис. 59. Схема обмотки статора багатополусної машини.

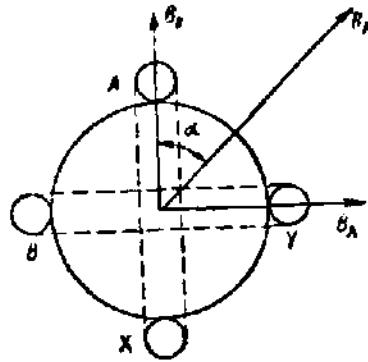


Рис. 60. Магнітне поле двофазної симетричної системи змінного струму.

B_p буде виражене як геометрична сума магнітних полів котушок A і B :

$$B_p = \sqrt{B_A^2 + B_B^2} = \sqrt{(B_m \sin \omega t)^2 + (B_m \cos \omega t)^2} = B_m.$$

Отже, у будь-який момент результуюче магнітне поле двофазної обмотки буде незмінним і дорівнюватиме амплітуді магнітної індукції однієї фази.

Можна записати:

$$\operatorname{tg} \alpha = B_A / B_B = \sin \omega t / \cos \omega t = \operatorname{tg} \omega t,$$

звідки $\alpha = \omega t$, тобто кут між вектором B_p і віссю ординат лінійно змінюється у часі, а отже, повертається зі сталою частотою обертання. За один період зміни струму в котушках вектор B_p повернеться на один повний оберт і кінець цього вектора опише коло. У загальному випадку для багатополусної машини частота обертання магнітного поля за хвилину $n = 60f/p$.

Щоб змінити напрямок обертання магнітного поля, треба змінити напрямок струму в одній із котушок, помінявши місцями провідники, що приєднують цю котушку до мережі, або помінявши місцями провідники, що приєднують до мережі котушки A і B .

Колове обертове магнітне поле зі сталою амплітудою матимемо в разі виконання таких трьох умов: рівність амплітуд $B_{Am} = B_{Bm}$; просторовий зсув осей котушок на кут 90° ; зсув за фазою сил струмів i_A та i_B на 90° . Якщо хоч одна з цих умов не буде виконана, то амплітуда результуючого поля не залишатиметься сталою і кінець вектора B_p опише не коло, а еліпс.

На практиці двигуни малої потужності живляться від однофазної мережі змінного струму і для того, щоб утворити фазний зсув між струмами двох котушок, одну з них вмикають у мережу безпосередньо, а другу — через конденсатор.

Контрольні запитання

1. Яка будова найпростішого генератора змінного струму?
2. Які значення ЕРС називаються миттєвим, амплітудним і діючим?
3. Поясніть явище поверхневого ефекту.
4. Яке співвідношення між силою струму і напругою при активному та індуктивному опорах у колі?
5. Як визначається повний опір кола з активним опором і конденсатором?
6. Як знайти повний опір кола з R, L, C ?
7. Як визначаються сили струмів у паралельно з'єднаних приймачах енергії?
8. Поясніть резонанс напруг і резонанс струмів.
9. Що називається активною, реактивною та повною потужністю і в яких одиницях вона вимірюється?
10. Поясніть схеми з'єднання обмоток трифазного генератора.
11. До чого призведе обрив нульового приводу у разі несиметричного навантаження?
12. Яке співвідношення між фазними й лінійними напругами та силами струмів за різних схем з'єднання споживачів?
13. Як вимірюють потужність і енергію трифазної системи, якщо навантаження симетричне і несиметричне?
14. Як визначається частота обертання магнітного поля, збуджуваного трифазною симетричною системою котушок?

Розділ V. ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИБАДИ

§ 44. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ПРИБАДІВ

У процесі експлуатації апаратури вимірюють силу струму, напругу, опір, потужність, частоту й витрату електричної енергії. Для цього застосовують різні електровимірювальні прилади.

Вимірювання — це визначення розмірів фізичної величини дослідним шляхом за допомогою вимірювальних приладів.

Багато електровимірювальних приладів мають рухома й нерухома частини. Рухома частина, до якої входять котушка або сталевий явір, механічно об'єднана зі стрілковим покажчиком та зворотними пружинами з фосфористою бронзою (рис. 61).

Принцип дії вимірювальних приладів незалежно від їхнього призначення зводиться ось до чого: електричний струм, проходячи через прилад, обумовлює появу обертаючого моменту, який дає змогу подолати протидію спіральних пружин 2 (див. рис. 61), рухома частина повертається на певний кут α . При цьому стрілка 3, перемістившись по шкалі 4, покаже значення вимірюваної величини. Коли прилад вимикається, обертаючий момент зникає і рухома частина завдяки пружності спіральних пружин 2 повертається у вихідне положення.

У разі зміни температури навколишнього середовища пружність зворотних пружин теж змінюється, а це призводить до деякого повороту рухомої частини. Проте перед початком вимірювань стрілка приладу

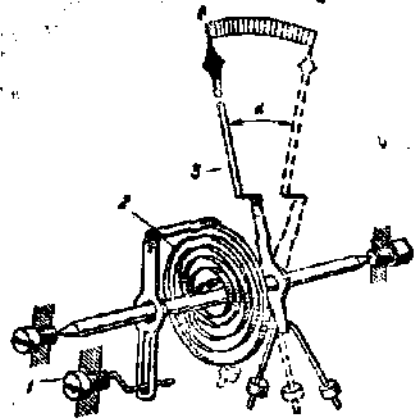
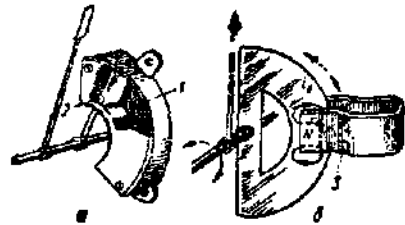


Рис. 61. Будава рухомої частини електровимірювального приладу.

Рис. 62. Будава заспокоювача:

1 — повітряного; 2 — магнітного; 3 — камери повітряного заспокоювача; 4 — поршень; 5 — постійний магніт.



має знаходитись напроти вихідної (нульової) поділки шкали. Стрілку встановлюють у це положення коректором 1.

Згідно з умовами експлуатації рухома частина приладу повинна швидко заспокоюватися, що забезпечується застосуванням повітряного або магнітного заспокоювача. У повітряному заспокоювачі (рис. 62, а) використовується гальмування рухомої системи внаслідок стиснення або розрідження повітря в камері заспокоювача, а в магнітному (рис. 62, б) застосовано принцип магнітного гальмування (під дією вихрових струмів силою I_d). Щоб зменшити тертя й підвищити точність вимірювання, у деяких приладах вісь рухомої частини закріплюють на кернях у підп'ятниках із високотвердих каменів (рубіну, сапфіру, агату).

Вимірювальні прилади розрізняють за призначенням, родом вимірюваного струму, принципом дії, класом точності, а також за формою корпусу, положенням під час вимірювання та характером застосування.

За призначенням прилади поділяються на амперметри, вольтметри, омметри, ватметри, лічильники, частотоміри тощо.

Вимірювальні прилади можна застосовувати в колах змінного або постійного струму. Але є прилади, призначені для вимірювання в кола і змінного і постійного струмів.

За принципом дії електровимірювальні прилади належать до таких найпоширеніших систем: електромагнітної, магнітоелектричної, електродинамічної, індукційної, електростатичної, термоелектричної та вібраційної.

У зв'язку з тим що абсолютно точних приладів немає, їх покази дещо відрізняються від дійсних значень вимірюваної величини.

Різниця між показом приладу і дійсним значенням вимірюваного параметра називається абсолютною похибкою. Наприклад, якщо напруга джерела становить 100 В, а вольтметр зі шкалою на 150 В, ввімкнений в це коло, показує 103 В, то абсолютна похибка $\Delta A = U_{\text{п}} - U_{\text{дж}} = 103 - 100 = 3 \text{ В}$.

Відношення абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваного параметра називається відносною похибкою приладу: $\gamma_{\text{вд}} = (\Delta A / A) \cdot 100 \%$. Якщо абсолютна похибка дорівнює 3 В, а значення вимірюваної величини становлять 50 і 100 В, то відносна похибка для першого вимірювання буде $(3/50) \cdot 100 \% = 6 \%$, а для другого вимірювання — $(3/100) \cdot 100 \% = 3 \%$. Виходить, що відносна похибка на початку шкали більша, ніж у кінці. Це треба враховувати, вибираючи межу вимірювань в універсальних вимірювальних приладах (авометрах). Найменша похибка у вимірюваннях — при використанні останньої третини шкали.

Отже, точність стрілкових вимірювальних приладів (найпоширеніших) оцінювати за їх відносною похибкою незручно, оскільки абсолютна похибка у них приблизно однакова вздовж усієї шкали. Зі зменшенням значення вимірюваного параметра швидко зростає відносна похибка. Для оцінки точності стрілкових вимірювальних приладів служить їх зведена похибка, яка дорівнює відношенню абсолютної похибки показів ΔA до значення, що відповідає найбільшому (номінальному) показу приладу A_n , у процентах: $\gamma_{\text{зв}} = (\Delta A / A_n) \cdot 100 \%$.

У нашому випадку абсолютна похибка — 3 В, найбільший показ приладу — 150 В і зведена похибка $\gamma_{\text{зв}} = (3/150) \cdot 100 \% = 2 \%$. За нормальних експлуатаційних умов (температура 20 °С, правильне встановлення, відсутність зовнішніх магнітних полів і великих ферромагнітних мас) зведена похибка називається основною похибкою приладу.

За ступенем точності вимірювальні прилади поділяються на вісім класів: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4. Цифри означають основну похибку в процентах.

Прилади класів точності 0,05 та 0,1 вважаються контрольними; 0,2 і 0,5 — лабораторними; 1, 1,5 і 2,5 — технічними; 4 — навчальними. Контрольні прилади обладнані дзеркальною шкалою та пожевидною стрілкою. Лабораторні прилади мають пожевидну стрілку, але дзеркальної шкали у них може й не бути. У технічних та навчальних приладах є списоподібна стрілка, але немає дзеркальної шкали.

Дзеркальна шкала, яка являє собою пластину з покрібленого скла, розташовану під дугоподібним вирізом шкали, забезпечує високу точність зняття показів приладу. Під час визначення показів приладу із дзеркальною шкалою око спостерігача має бути розташоване так, щоб стрілка закривала своє зображення у дзеркальній шкалі.

Таблиця 2. Умовні позначки на шкалах електровимірювальних приладів

Система приладу	Умовна позначка	Знак на шкалі приладу
Електромагнітна		Струм: постійний змінний трифазний
Магнітоелектрична		
Електродинамічна		Затискач: загальний
Індукційна		в'єднаний з корпусом
Вібраційна		для заземлення
Випрямна		Встановлення приладу: вертикальне горизонтальне
Термоелектрична		під кутом
Феродинамічна		Вимірювальне коло ізольоване від корпусу й випробуване напругою 2 кВ
Електростатична		

За формою корпусу прилади бувають круглі, квадратні, прямокутні та сектороподібні; за характером застосування — стаціонарні (жорстко закріплені на місці встановлення) та переносні; за положенням під час вимірювання — вертикальні (\perp), горизонтальні ($-$) або такі, що встановлюються під певним кутом (\angle).

Промисловість випускає електровимірювальні прилади трьох експлуатаційних груп (А, Б та В), що характеризують допустиму

температуру навколишнього середовища, за якої можна експлуатувати. Допустима температура навколишнього середовища для групи А — $0...+35\text{ }^{\circ}\text{C}$; групи Б — $30...+40\text{ }^{\circ}\text{C}$; групи В₁ — $40...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$; групи В₂ — $50...+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Належність приладу до експлуатаційних груп Б і В зазначається на шкалі. Прилади експлуатаційної групи А позначок на шкалі не мають. Умовні позначення деяких приладів наведено в табл. 2.

На шкалі вимірювальних приладів умовними позначками й цифрами наводяться такі дані: рід струму, для якого призначений прилад, система приладу, напруга ізоляції, положення під час вимірювань, клас точності, а також рік випуску, номер приладу та його належність до експлуатаційної групи. Наприклад, вимірювальний прилад, шкалу якого зображено на рис. 63, можна охарактеризувати так: вольтметр (V) для вимірювання змінної напруги в межах від 0 до 150 В, електромагнітної системи, вертикального положення, класу точності 1,0. Ізоляція приладу випробувана на напругу 2 кВ; рік випуску 1975; заводський номер 3275; експлуатаційна група Б.

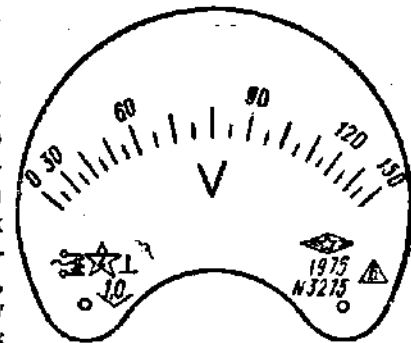


Рис. 63. Шкала вольтметра.

Експлуатуючи прилади, потрібно дотримуватись таких основних правил перед зв'язанням приладу: стрілку треба встановити коректором на нульову поділку шкали; прилад слід вмикати в коло того роду струму, для якого він призначений; під час вимірювань корпус приладу повинен займати положення, яке відповідає його нормальному встановленню.

§ 45. ПРИЛАДИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ

Електромагнітні вимірювальні прилади застосовують для вимірювання сили струму або напруги в колах змінного чи постійного струму. Прилади цього типу промисловість випускає у двох конструктивних варіантах із плоскою та круглою катушкою.

Дія електромагнітного приладу з плоскою катушкою ґрунтується на принципі втягування феромагнітного осердя в катушку зі струмом. Такий прилад (рис. 64) являє собою катушку 1, намотану на каркас в щілиноподібним отвором. Рухомою частиною приладу складається з осі в'ї стрілкою, несиметрично закріпленою осердя 2 та зворотної пружини 3. Для швидкого заспокоєння стрілки відносно положення рівноваги служить в'ї заспокоювач із повітряним гальмуванням 4.

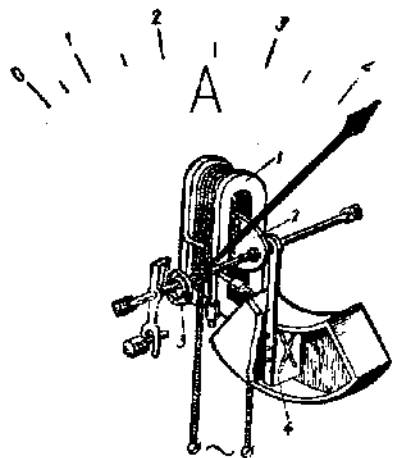
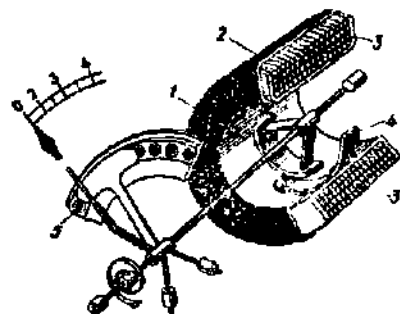


Рис. 64. Будова електромагнітного приладу з плоскою котушкою.

Рис. 65. Будова електромагнітного приладу з круглою котушкою.



Якщо прилад увімкнути в мережу, то по котушці пройде струм і магнітне поле, яке виникає при цьому, втягне осердя всередину котушки. Осердя закріплене на осі несиметрично, тому рухома частина приладу повертається на деякий кут. Рухома частина повертатиметься доти, поки обертаючий момент, утворений струмом, не зрівноважиться протидіючим моментом спіральної пружини.

Кут повороту рухомої частини залежить від сили, з якою осердя втягується всередину котушки. Ця сила прямо пропорційна силі струму I та магнітній індукції B поля котушки: $F = kBI$, де k — коефіцієнт пропорційності.

Оскільки за відсутності насичення магнітна індукція прямо пропорційна силі струму, то кут повороту рухомої частини буде прямо пропорційний квадратові сили струму. У цьому разі шкала приладу має бути квадратичною. Проте наявність у приладі феромагнітного осердя ускладнює цю залежність, внаслідок чого шкала електромагнітних вимірювальних приладів нерівномірна. Надаючи осердю спеціальної форми та змінюючи його розташування відносно котушки, можна добитися деякого зменшення нерівномірності шкали в більшій її частині, крім початкових поділок, які залишаються дуже стисненими.

У котушках електромагнітних вольтметрів велика кількість (2000...10 000) витків проводу діаметром 0,08...0,1 мм. У котушках амперметрів невелика кількість витків товстого мідного проводу круглого або стрічкового перерізу. Зовнішні магнітні поля виявляють великий вплив на роботу електромагнітного приладу, але завдяки феромагнітному кожухові цей вплив значно послаблюється.

У приладі з круглою котушкою (рис. 65) всередині неї розміщені два осердя: рухоме 1, жорстко закріплене на осі приладу разом зі

стрілкою, та нерухоме 4. Коли по котушці 3 протікає струм, який збуджує магнітне поле, кінці осердя намагнічуються з однаковою полярністю і відштовхуються їхніх однойменних полюсів створює обертаючий момент. Рухоме осердя 1, відштовхуючись від нерухомого 5, повертає вісь зі стрілкою на деякий кут. Для послаблення впливу зовнішніх магнітних полів котушка забезпечена феромагнітним екраном 2. Прилад обладнано магнітним заспокоювачем 5.

У магнітному полі електромагнітного приладу відносно невелика кількість сталі, і велика частина магнітного потоку проходить у повітрі. Через це вимірювальний механізм електромагнітної системи має малу чутливість, отже, важко виготовити амперметр на низьку силу струму (до 0,5 А) або вольтметр на низьку напругу (менше 10 В).

Здатність приладу працювати в колах змінного і постійного струму пояснюється тим, що зміна напрямку струму в котушці призводить до перемагнічування осердя, внаслідок чого напрямок обертаючого моменту не міняється. У разі змінного струму прилад показує діючі значення струму або напруги. Потужність, яку споживають електромагнітні прилади від мережі, становить від 2 до 8 Вт.

До переваг електромагнітних приладів слід віднести їхню простоту, дешевизну, надійність в експлуатації, здатність витримувати короточасні перевантаження, а також придатність для вимірювання в колах змінного й постійного струму.

Недоліками приладів електромагнітної системи є порівняно низька точність (клас точності — 1; 1,5; 2,5), нерівномірність шкали, досить велика споживана потужність, залежність показів від частоти струму та впливу зовнішніх магнітних полів.

5 46. ПРИЛАДИ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

Прилади магнітоелектричної системи застосовують для вимірювання сили струму й напруги в колах постійного струму. Робота приладів магнітоелектричної системи ґрунтується на взаємодії магнітного поля та провідника зі струмом.

Нерухома частина приладу (рис. 66) складається з постійного магніту 3 та сталевго циліндра 2. Між полюсами магніту й сталевим циліндром є кільцевий повітряний зазор, у якому утворюється сильне й практично однорідне магнітне поле. Рухома частина приладу являє собою котушку, виконану з тонкого проводу на легкій алюмінієвій рамці 1, яка вільно обертається (на двох напівосях) у кільцевому повітряному зазорі. До передньої напівосі прикріплена стрілка з противагами 4, призначеними для зрівноважування рухомої системи приладу. Протидіючий момент утворюється двома спіральними пружинами, через які на рамку підводиться електричний струм.

Якщо ввімкнути прилад, то по котушці пройде струм і виникне механічна сила, яка згідно з правилом лівої руки повертатиме рамку на певний кут. Ця сила залежить від магнітної індукції B , сили струму в котушці I , кількості витків ω та активної довжини l провідника: $F = 2B I \omega l$.

Через те що магнітна індукція, активна довжина та кількість витків — у кожному конкретному типі приладу величини сталі, то кут повороту рамки обумовлюватиметься лише силою струму, що протікає по котушці приладу, та протидіючим моментом поворотних пружин. Тому у приладів магнітоелектричної системи шкала рівномірна.

Коли рамка повертається у магнітному полі, в її витках індукується ЕРС, напрямком якої визначається за правилом Ленца. Струм, що виникає під впливом ЕРС, обумовлює появу протидіючої сили, яка сприяє швидкому заспокоєванню рухомої частини приладу. Завдяки цьому відпадає потреба в заспокоювачі.

Прилади магнітоелектричної системи полярні (тобто мають додатний і від'ємний затискачі), а в колі змінного струму не дають показів. У разі протікання по котушці змінного струму обертаючий момент із частотою струму змінює свій напрямок. Внаслідок інерції рухома частина не встигатиме коливатися з частотою струму, тому залишиться нерухомою і прилад не дасть показів.

Завдяки високій точності, чутливості, рівномірній шкалі, невеликому споживанню енергії ($10^{-4} \dots 10^{-6}$ Вт), швидкому заспокоєнню рухомої частини та низькій чутливості до зовнішніх полів широко застосовуються такі прилади цієї системи, як вольтметри, мілі- та мікроамперметри, а також універсальні прилади (авометри).

До недоліків приладів цієї системи належать порівняно висока вартість, чутливість до перевантажень та придатність тільки для кіл постійного струму. Останній недолік можна усунути, якщо ввімкнути прилад через напівпровідниковий вентиль, але в цьому разі прилад уже відноситься до випрямної системи.

§ 47. ПРИЛАДИ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ

Прилади електродинамічної системи застосовують для вимірювання напруги, сили струму та потужності в колах змінного і постійного струму.

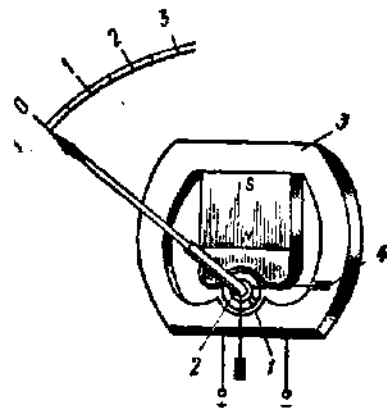


Рис. 66. Будова приладу магнітоелектричної системи.

Робота електродинамічних приладів ґрунтується на взаємодії провідників зі струмами. У складі приладу (рис. 67) є нерухома котушка 1 з невеликою кількістю витків товстого дроту та рухома котушка 2 з великою кількістю витків тонкого дроту, розміщена всередині нерухомої. На осі рухомої котушки закріплені стрілка 5 і пружини 4, призначені для підведення струму і створення протидіючого моменту. Нижній кінець стрілки закінчується поршнем 3 повітряного заспокоювача. У зв'язку з чутливістю приладу до зовнішніх магнітних полів застосування заспокоювача в цій системі неприємне.

Якщо прилад ввімкнути в коло, то по котушках протікатиме струм, і магнітні поля, що виникають при цьому, обумовлюватимуть появу електродинамічної сили, яка прагнучим повернути рухома частину так, щоб магнітні поля обох котушок збігалися за напрямком. Припустимо, що через котушки приладу протікають струми однакової сили. Тоді сила взаємодії котушок (і обертаючий момент) будуть прямо пропорційні квадратові сили струму: $F = KI^2$. Тому в електродинамічних амперметрів шкала нерівномірна.

У приладі, ввімкненому в мережу змінного струму, напрямком обертаючого моменту не зміниться, оскільки напрямком струму змінюється одночасно в обох котушках. У колах змінного струму прилади цієї системи показують діючі значення вимірюваної величини.

У разі використання приладу для вимірювання напруги рухома і нерухома котушки з'єднують послідовно. Таке ж з'єднання застосовують для вимірювання невеликих сил струмів (до 0,5 А). Щоб вимірювати великі сили струмів, котушки приладу з'єднують паралельно. Коли вимірюють потужність, нерухома котушку вмикають послідовно, а рухома — паралельно. У останньому випадку через нерухома котушку протікатиме струм навантаження, а через рухома — струм, сила якого прямо пропорційна напрузі на навантаженні, що обумовить виникнення обертаючого моменту, прямо пропорційного потужності, що споживається навантаженням ($P = UI$). З цієї причини шкала електродинамічних ватметрів рівномірна.

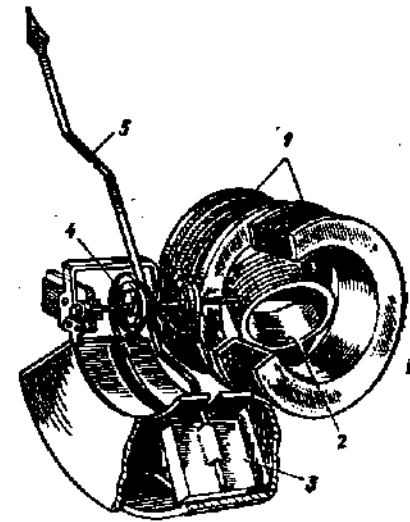


Рис. 67. Будова приладу електродинамічної системи.

Переваги електродинамічних приладів: придатність для вимірювання в колах змінного й постійного струму; можливість використання для вимірювання напруги, сили струму та потужності; висока точність; рівномірність шкали (у вагметрів). Недоліки: порівняно велике споживання потужності (при вимірюванні сили струму й напруги); чутливість до зовнішніх магнітних полів і перевантажень; висока вартість.

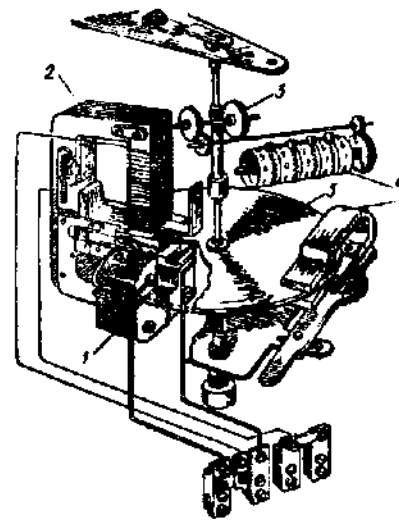
Електродинамічні прилади зі сталевим осердям називаються феродинамічними. Проте з застосуванням сталі знижується точність приладу внаслідок впливу гістерезису та вихрових струмів. Тому прилади феродинамічної системи для точних вимірювань непридатні. Вони застосовуються переважно як реєструючі прилади та щитові вагметри.

§ 48. ПРИЛАДИ ІНДУКЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Прилади індукційної системи служать для вимірювання витрат електричної енергії в колах змінного струму. Робота індукційного лічильника ґрунтується на взаємодії вихрових струмів з обертовим магнітним полем. Основними деталями індукційного лічильника (рис. 68) є два електромагніти 1 і 2, рухомий алюмінієвий диск 5, редуктор 3, лічильний механізм 4 та гальмівний магніт 6.

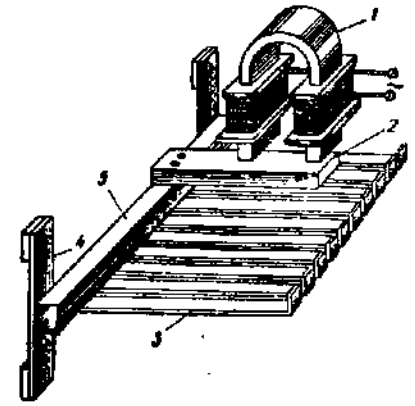
У магнітної системи електромагнітів 1 і 2 є повітряні зазори, причому котушка електромагніту 1 з'єднується з навантаженням послідовно, а котушка електромагніту 2 — паралельно. За певного розміщення електромагнітів між їхніми полюсами утворюється обертове магнітне поле, в якому вільно обертається алюмінієвий диск. Обертове магнітне поле, пронизуючи алюмінієвий диск, індукуює в ньому вихрові струми. Внаслідок взаємодії вихрових струмів з обертовим магнітним полем виникає механічна сила, яка обертає диск 5. Сила взаємодії між вихровими струмами й обертовим магнітним полем прямо пропорційна добуткові миттєвих значень сили струму на напругу, тобто потужності струмоприймачів: $M = kP$, де k — сталий коефіцієнт.

Щоб швидкість обертання диска була прямо пропорційна потужності струмоприймачів, застосовано гальмівний магніт 6. У диску під час обертання його між полюсами гальмівного магніту індукуються вихрові струми, які, взаємодіючи з магнітним полем магніту, утворюють протидіючий момент, прямо пропорційний частоті обертання диска. Чим швидше обертається диск, тим більша сила його гальмування. Частота обертання диска стає сталою, коли обертаючий момент зрівноважується гальмівним моментом. Лічильний механізм приладу вимірює кількість обертів диска, тобто параметр, прямо пропорційний енергії, витрачуваний на роботу струмоприймача.



◁ Рис. 68. Лічильник електричної енергії.

Рис. 69. Будова частотоміра вібраційної системи.



§ 49. ПРИЛАДИ ВІБРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Прилади вібраційної системи призначаються для вимірювання частоти змінного струму. Дія вібраційних приладів ґрунтується на використанні явищ електромагнетизму й механічного резонансу. Кожна механічна система, яка здатна виконувати коливальні рухи, має певну частоту власних коливань, яка обумовлюється масою та пружністю системи. У разі резонансу, тобто коли збігаються частоти власних коливань системи і коливань зовнішнього джерела, амплітуда коливань даної механічної системи різко збільшується. Ця властивість використовується у вимірювальних приладах вібраційної системи.

Вібраційний частотомір (рис. 69) складається з електромагніту 1, сталевого якоря 2, закріпленого на бруску 5, та кількох вібраторів 3 з різною довжиною або масою. Кінці вібраторів відігнуті під прямим кутом і розміщені горизонтально в щілині на шкалі частотоміра. Брусок 5 прикріплений до пластинчастих пружин 5 і це забезпечує певну рухомість механічної системи.

Якщо по обмотці електромагніту пропустити змінний струм, то якір 2 дужче притягуватиметься до полюсів у ті моменти, коли сила струму буде найбільшою, тобто два рази за період. Коливання якоря передаються вібраторам. З найбільшою амплітудою коливатиметься вібратор, власна частота коливань якого збігається з частотою коливань якоря. Цифра, яка знаходиться на шкалі напроти вібратора, що коливається з найбільшою амплітудою, покаже частоту струму в мережі.

Більшість частотомірів вібраційної системи призначені для вимірювання частот 45...55 Гц. Проте є й частотоміри, розраховані на вимірювання більш високих частот (1550...1650 Гц).

Перевагою приладів вібраційної системи є незалежність показів від напруги в мережі. Недоліки цих приладів полягають у залежності показів від механічних вібрацій, неможливість вимірювання високих частот і переривність шкали, внаслідок чого утруднюються вимірювання на проміжних частотах, коли одночасно коливаються кілька вібраторів.

§ 50. ВИМІРЮВАННЯ СИЛИ СТРУМУ ТА НАПРУГИ

Для вимірювання сили струму та напруги використовуються вимірювальні прилади різних систем — амперметри та вольтметри, умовні позначення і схеми приєднання яких наведені на рис. 4.

Малі сили струму вимірюють гальванометрами, мілі- та мікроамперметрами, а низькі напруги — мілі- та мікрОВОльтметрами.

Приєднання амперметра послідовно з навантаженням не повинно впливати на вимірювану силу струму в колі, тому опір амперметра має бути малим порівняно з опором приймача енергії. За малого опору амперметра R_a мала і споживана ним потужність $P_a = I_a^2 R_a$.

Ввімкнення вольтметра не повинно впливати на вимірювану напругу, тому опір вольтметра має бути більшим від опору приймача, паралельно якому він приєднаний. За великого опору вольтметра R_v сила струму I_v в ньому мала і споживана ним потужність $P_v = I_v^2 R_v$ теж невелика.

Для вимірювання сил струмів і напруг, які перевищують верхню межу вимірювання приладу, застосовують при постійному струмі шунти й додаткові опори, а при змінному — вимірювальні трансформатори сили струму й напруги (див. § 62).

Якщо амперметром потрібно виміряти силу струму, яка перевищує межі шкали, то паралельно амперметрові приєднують шунт $R_{ш}$. Насправді шунт приєднують послідовно з навантаженням, а амперметр — паралельно шунтові. Шунт являє собою товсту константанову або манганінову пластину. Використання для цього манганіну і константану пояснюється тим, що опір цих металів незначною мірою залежить від температури. Якщо опір шунта в 9 разів менший від опору обмотки амперметра, то 0,9 сили струму пройде через шунт і лише 0,1 — через прилад. При цьому межі вимірювань приладу розширюються в 10 разів.

Опір шунта визначають за формулою $R_{ш} = R_a / (n - 1)$, де R_a — опір обмотки амперметра; n — число, що показує, у скільки разів розширюються межі вимірювань приладу. Після приєднання шунта на шкалі приладу треба проставити множник (у даному випадку

× 10). У разі ввімкнення амперметра з шунтом фактична сила струму в колі визначається добутком показів приладу на множник n .

Шунт повинен мати чотири контакти: до двох приєднують прилад, а до інших двох — з'єднувальні проводи електричного кола. Таке приєднання виключає залежність показів приладу від перехідних опорів контактів.

У тих випадках, коли вольтметром потрібно виміряти напругу, яка перевищує межі шкали, то послідовно з вольтметром приєднують додатковий резистор опором R_d . Якщо в додатковому резисторі опір R_d буде в 9 разів більший від опору обмотки вольтметра, то 0,9 загальної напруги припадатиме на додатковий резистор R_d і лише 0,1 — на опір обмотки вольтметра R_v . При цьому межі вимірювання приладу розширюються в 10 разів. Опір додаткового резистора розраховують за формулою $R_d = R_v (n - 1)$, де n — число, яке показує, у скільки разів розширюються межі вимірювань приладу.

Очевидно, що після приєднання додаткового резистора потрібно виготовити нову шкалу або на тій шкалі, яку має прилад, поставити відповідний множник. Оскільки опір додаткових резисторів у щитових приладах може досягати кількох тисяч омів, їх виконують у вигляді котушок з тонкого дроту з великим питомим опором.

Шунти та додаткові резистори можна монтувати всередині приладу або приєднувати до його затискачів на час вимірювань. В останньому випадку на шкалі приладу зазначають: «З окремим шунтом» або «З окремим додатковим резистором».

§ 51. ВИМІРЮВАННЯ ОПОРІВ

Для вимірювання опорів можна використати метод амперметра і вольтметра. Частка від ділення показів вольтметра, приєданого до випробуваного резистора, на покази амперметра, приєданого послідовно з цим резистором, визначає його опір $R = U/I$. Для більшої точності в разі вимірювання малих опорів приладу слід приєднати за схемою (рис. 70, а) так, щоб опір амперметра не вносив похибки в покази вольтметра, а в разі вимірювання великих опорів (рис. 70, б) — так, щоб сила струму вольтметра не впливала на покази амперметра. Додатковий резистор R_d введено для обмеження сили струму.

Для безпосереднього вимірювання опорів використовують омметри та мегаомметри, які можна вмикати в схему послідовно або паралельно.

Омметр являє собою вимірювальний прилад магнітоелектричної системи з внутрішнім $R_{дз}$ та додатковим R_d резисторами. Послідовно з омметром приєднують вимірювальний резистор R_x (рис. 70, в). Якщо резистор R_x від'єднати і кнопку K розімкнути, то струму в колі не буде і стрілка приладу покаже нескінченно великий опір ($R_x = \infty$).

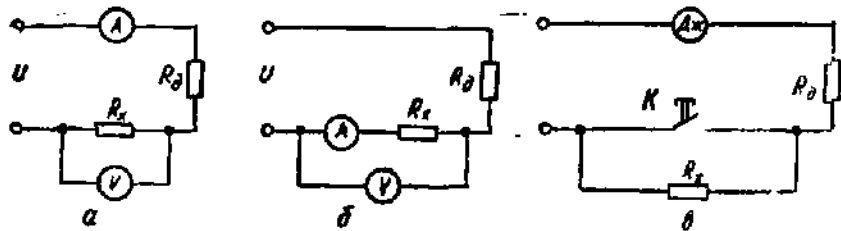


Рис. 70. Схеми приєднання амперметра та вольтметра для вимірювання опору:
а — малих; б — великих; в — послідовна схема омметра.

Якщо кнопку K замкнути, то опір кола ($R_x + R_{дж}$) буде мінімальним, тобто сила струму буде максимальною $I_{max} = U/(R_x + R_{дж})$, і стрілка приладу відхилиться на найбільший кут, показуючи нульовий опір ($R_x = 0$). Якщо приєднати вимірюваний резистор R_x , сила струму в колі зменшиться $I = U/(R_x + R_x + R_{дж})$, і стрілка приладу відхилиться на менший кут, показуючи на шкалі приладу значення опору R_x . Омметр має самостійне джерело живлення у вигляді сухих елементів. Недоліком такого омметра є залежність його показів від напруги джерела живлення.

Одним із методів вимірювання опору та інших електричних параметрів (індуктивності, ємності) є застосування моста постійного та змінного струму. Міст для вимірювання опору (рис. 71) складається з трьох плечей з регульованими резисторами R_1 , R_2 , R_3 (магазинні опори), які разом з четвертим вимірюваним резистором R_x утворюють замкнений контур $АГБВ$. До точок B і $Г$ приєднується джерело живлення, а до точок A і $Б$ — гальванометр $Г$. Регулюванням резисторів R_1 , R_2 та R_3 добиваються нульового відхилення стрілки гальванометра. У цьому разі потенціали точок A і $Б$ однакові (міст зрівноважено), тобто $U_{AB} = U_{BA}$ і $U_{AG} = U_{BG}$, або $I_1 R_1 = I_2 R_x$ і $I_1 R_3 = I_2 R_3$. Поділивши одну рівність на другу, матимемо $I_1 R_1 / I_1 R_3 = I_2 R_x / I_2 R_3$, звідки $R_x = R_1 R_3 / R_2$.

Рис. 71. Схема моста для вимірювання опору.

Коли вимірюються малі опори, велику похибку вносять опори контактів і з'єднувальних провідників. У цих випадках використовуються складніші схеми (подвійні мости).

У разі незмінних напруги живлення та опорів R_1 , R_2 і R_3 трьох плечей моста покази гальванометра залежать від опору R_x , що дає змо-

гу на шкалу гальванометра нанести значення вимірюваного опору або значення того параметра, від якого залежить опір (температури, тиску, вологості тощо). Такі мости називаються незрівноваженими.

Справна робота будь-якої електротехнічної установки великою мірою залежить від стану ізоляції між проводами та між струмоведучими частинами та землею. Ця ізоляція відносно легко зазнає старіння від дії вологи, високої температури і т. д.; тому опір ізоляції потрібно періодично вимірювати.

Опір ізоляції мережі, яка не перебуває під робочою напругою, вимірюють мегаомметром, один затискач якого (позначений літерою L) приєднують до випробуваного провідника, а другий його затискач (позначений літерою Z) з'єднують із землею. Обертаючи ручку індуктора мегаомметра, який являє собою маленький магнітоелектричний генератор, на шкалі приладу відлічують значення вимірюваного опору. Для вимірювання опору ізоляції між двома проводами до них приєднують затискачі L і Z мегаомметра. Згідно з Правилами устаткування електроустановок найменший допустимий опір ізоляції освітлювальних та силових електропроводок становить 0,5 МОм.

§ 52. ЛОГОМЕТРИ

Логометри (від грецького слова «логос» — відношення) називаються прилади, у яких кут повороту вимірювальних механізмів залежить від відношення сил струмів.

У більшості електровимірювальних приладів безпосереднього відліку відхилення рухомої частини залежить від сили струму, що протікає через прилад. Під час вимірювання певного електричного чи неелектричного параметра X (переміщення, тиск, кут повороту тощо) потрібно, щоб сила струму, що протікає через прилад, залежала від параметра, який має бути вимірюваний. Проте сила струму прямо пропорційна напрузі і покази приладу для вимірювання певного параметра X стають залежними від двох змінних — вимірюваного параметра та напруги U джерела струму. У разі відсутності прямої залежності між X та U залежність показів приладу від напруги виключає можливість градування шкали в одиницях X (наприклад, в омах), оскільки зміна напруги призведе до похибок у вимірюваннях. Щоб уникнути впливу змін напруги на покази приладу, в логометрах положення рівноваги рухомої частини обумовлюється відношенням сил струмів.

Електровимірювальний прилад будь-якої системи є логометром, якщо в ньому не тільки обертаючий, але й протидіючий моменти утворюються електричним шляхом, тобто для логометрів характерна відсутність механічного протидіючого моменту (пружин). Спрощену схему магнітоелектричного логометра для вимірювання опору наведено

на рис. 72. Рухома частина приладу складається з двох рамок, установлених на спільній осі і жорстко скріплених між собою під певним кутом. Струм котушок, намотаних на рухомі рамки, підводиться через три м'які срібні спіралі, які не утворюють механічного моменту. Якщо рухома частина добре зрівноважена, то за відсутності струмів вона перебуватиме у стані індиферентної рівноваги. Рухомі котушки приєднуються до спільного джерела струму, а їхні кола замикаються через резистори: R — змонтований всередині приладу; R_x , опір якого вимірюється, — зовні приладу. Струми, що протікають по котушках приладу, взаємодіючи з магнітним полем полюсів, утворюють два моменти: $M_{об}$ — обертаючий та $M_{пр}$ — протидіючий. Ці моменти протилежні за напрямком, причому повертання рухомої частини в напрямку одного з моментів обумовлює зменшення цього моменту, бо котушка, що утворює цей момент, входить у розрідженішу частину магнітного поля; одночасно з цим збільшується момент протилежного напрямку.

Отже, автоматично встановлюється рівновага моментів ($M_{об} = M_{пр}$), і будь-якому відношенню сил струмів у котушці приладу відповідає деяке положення рівноваги за певного відхилення стрілки приладу. Кут відхилення стрілки приладу залежить від відношення сил струмів у котушках I_1/I_2 .

Оскільки сили струмів у паралельних відгалуженнях обернено пропорційні опорам, тобто $I_1/I_2 = R/R_x$, а опір R відомий, то кут повороту стрілки приладу залежить тільки від вимірюваного опору R_x і на нього не впливає напруга джерела. Тому шкала приладу може бути градуйована в одиницях опору (в омах) і тоді логометр стане омметром. Якщо вимірюваний опір R_x виготовлений із провідного матеріалу з великим температурним коефіцієнтом, то цей же прилад можна використати як електричний термометр. Якщо за R_x взяти стовпчик з вугільних пластин, опір якого значною мірою залежить від сили їх стиснення, то прилад можна використати для вимірювання тиску та інших параметрів.

§ 53. ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕНЕРГІЇ

Для вимірювання потужності в колі постійного струму спеціальний прилад не потрібен, оскільки потужність $P = UI$ можна легко підрахувати за показами вольтметра й амперметра.

У колі змінного струму потужність залежить не тільки від напруги й сили струму, але й від зсуву фаз між ними: $P = UI \cos \varphi$. Тому для вимірювання потужності в цьому випадку потрібен спеціальний прилад — ватметр електродинамічної або феродинамічної системи. В електродинамічному ватметрі нерухома котушка з'єднується послідовно з навантаженням R_n , а рухома забезпечується додатковим

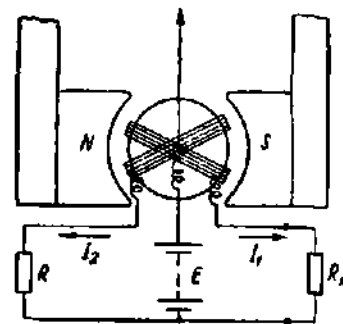


Рис. 72. Схема магнітоелектричного логометра.

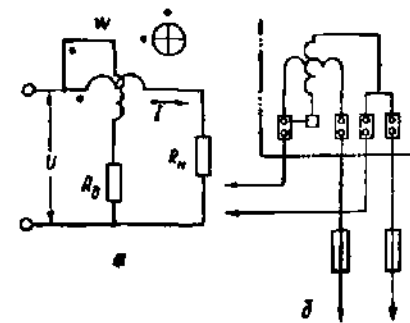


Рис. 73. Схема приєднання: а — ватметра; б — лічильника.

резистором R_d і приєднується паралельно навантаженню (рис. 73, а). Отже, миттєве значення сили струму нерухокої котушки дорівнює силі струму навантаження, а сила струму рухокої котушки прямо пропорційна напрузі на затискачах приймача і повинна збігатися з напругою за фазою. Щоб сила струму збігалася за фазою з напругою, додатковий активний опір R_d має бути набагато більшим від індуктивного опору самої обмотки, що дає змогу вважати опір кола напруги активним.

Обертаючий момент у електродинамічного ватметра прямо пропорційний добуткові напруги на силу струму. У разі введення ватметра в коло змінного струму на обертаючий момент не впливає одночасна зміна напрямку сили струму в обох котушках, але якщо поміняти місцями затискачі однієї з котушок ватметра, то це змінить фазу сили струму в цій котушці на 180° і напрямок обертаючого моменту. Щоб запобігти можливості неправильного приєднання ватметра, відносні «початки» двох його котушок (генераторні затискачі), приєднані до одного й того ж полюса джерела, позначаються біля затискачів приладу знаком \times ; кінці цих котушок приєднані до різних полюсів навантаження. Електродинамічні ватметри використовуються в колах змінного й постійного струму.

Для феродинамічних ватметрів характерна менша точність вимірювання і для кіл постійного струму вони непридатні через вплив гістерезису.

Витрати електричної енергії змінного струму вимірюють лічильниками індукційної системи. Схема ввімкнення лічильника в мережу (рис. 73, б) аналогічна схемі приєднання ватметра, тобто одна обмотка лічильника з'єднується послідовно з навантаженням, а друга — паралельно йому. На відміну від ватметрів у колі паралельної обмотки жодних додаткових резисторів немає, бо для створення обертового магнітного поля сили струмів у двох котушках мають бути зсунуті

за фазою на кут, що наближається до 90° . На таблиці лічильника зазначено напругу, силу струму, частоту, на які він розрахований, у яких одиницях вимірюється енергія, якій кількості обертів диска відповідає витрата енергії $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

§ 54. ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Широко застосовується вимірювання неелектричних параметрів електричними методами, які дають змогу виконувати дистанційні, безперервні, високої точності й чутливі вимірювання. Для вимірювання неелектричний параметр перетворюють у залежний від нього електричний, який визначається за показами електровимірювального приладу. Елемент, який перетворює неелектричний вимірюваний параметр у залежний від нього електричний, називається п е р в и н и м п е р е т в о р ю в а ч е м. Перетворювачі поділяються на дві групи: п а р а м е т р и ч н і, що перетворюють неелектричну величину в один із параметрів електричного кола R , L або C , та г е н е р а т о р н і, в яких неелектрична величина перетворюється в ЕРС.

Вище зазначалось (див. § 52), що під час вимірювання опору, який залежить від температури (терморезистор), логометр стає термометром і його шкалу можна проградувати в градусах. Якщо за чутливий елемент використовують тензорезистор, то прилад вимірює силу стиснення або тиск. Якщо ж чутливим елементом є реостат (реостатний перетворювач), повзун якого переміщується під дією вимірюваної неелектричної величини, змінюючи опір реостата, то в цьому випадку логометр можна використати для визначення рівня рідини, лінійного або кутового переміщення деталі тощо.

Індуктивні та ємнісні параметричні перетворювачі служать для вимірювання сили, тиску, лінійного або кутового переміщення деталі. У цих перетворювачах індуктивність або ємність змінюється залежно від положення однієї з частин перетворювача під дією вимірюваної величини.

У генераторних перетворювачах індукційного типу вимірювана неелектрична величина (наприклад, швидкість, лінійні або кутові переміщення) перетворюється в ЕРС. Зокрема, індукційний тахометр, який служить для вимірювання частоти обертання, перетворює вимірювану величину в пропорційну їй ЕРС.

Тахометр являє собою генератор малої потужності, якір якого обертається в магнітному полі постійного магніту і ЕРС якого прямо пропорційна частоті обертання якоря. Якір механічно зв'язаний з валом машини, частота обертання якої вимірюється, тому покази вольтметра V , з'єданого з затискачами якоря, прямо пропорційні вимірюваній величині.

Крім індукційних, до перетворювачів генераторного типу належать термоелектричні, п'єзоелектричні та ін. У п'єзоелектричних

перетворювачах використовується виникнення ЕРС в деяких кристалах під дією механічних сил (п'єзоелектричний ефект) для вимірювання цих сил або тиску.

Пристрої для вимірювання неелектричних параметрів у своєму складі повинні мати перетворювач, з'єднувальні проводи та електровимірювальний прилад, шкала якого проградуєвана в одиницях вимірюваної величини. Насправді ці пристрої значно складніші, бо в них є ще джерела живлення, стабілізатори, випрямлячі, підсилювачі і т. д.

§ 55. ЦИФРОВІ ПРИЛАДИ

У сучасній вимірювальній техніці використовуються прилади з цифровою шкалою, або цифрові прилади. У цифрових приладах вимірюваний параметр, що безперервно змінюється, перетворюється в дискретний (переривистий) параметр у вигляді цифри, яка зображується на його відліковому пристрої. У цих приладах вимірюваний параметр порівнюється з заданим, тобто для вимірювання застосовується нульовий метод. Вимірюваний параметр спеціальною електронною схемою автоматично перетворюється в цифри, які висвітлюються на панелі цифрової індикації. Наприклад, у цифровій лампі розміщується десять катодів, які відповідають цифрам десяткового ряду $0 \dots 9$ і висвітлюють будь-яку цифру цього ряду, коли на них подається відповідний сигнал.

Цифровими приладами поступово замінюють стрілкові, оскільки для перших характерні вищі експлуатаційні показники. Наприклад, п'ятизначний цифровий прилад В7-18 можна використати для вимірювання сили струму, напруги, опору та частоти струму. Тривалість одного вимірювання не перевищує кількох мілісекунд із похибкою $0,01 \dots 0,1 \%$.

Цифрові прилади в поєднанні з обчислювальними машинами використовуються для автоматичного контролю керування виробничими процесами.

Недоліками цифрових приладів є їхня складна будова й порівняно висока вартість.

Контрольні запитання

1. Перелічіть системи і класи точності приладів.
2. Яка роль коректора, заспокоювача та дзеркальної шкали в приладах?
3. Поясніть будову і принцип дії приладів електромагнітної та магнітоелектричної систем.
4. Яка будова електродинамічного та індукційного приладів? Який у них принцип дії?
5. Яке призначення шуптів та додаткових резисторів?
6. Поясніть принцип роботи логометра.
7. Як вимірюють потужність і енергію?

Розділ VI. ТРАНСФОРМАТОРИ

§ 56. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТРАНСФОРМАТОРИ

Трансформатором називається статичний електромагнітний апарат, який перетворює змінний струм однієї напруги в змінний струм тієї ж частоти, але іншої напруги.

Трансформатори набули широкого практичного застосування для передачі електричної енергії на великі відстані, для розподілу енергії між її приймачами та в різних випрямних, сигнальних, підсилювальних та інших пристроях.

У передачі електричної енергії від електростанцій до споживачів велике значення має сила струму, що протікає по проводах. Залежно від сили струму вибирають площу перерізу проводів для лінії передачі енергії, а у зв'язку з цим визначають вартість проводів та втрати в них енергії.

Якщо за однієї і тієї самої передаваної потужності збільшити напругу, то такою ж мірою зменшиться сила струму, а це дасть змогу використовувати проводи з меншою площею поперечного перерізу для влаштування лінії передачі електричної енергії та знизити витрату кольорових металів, а також зменшити втрати потужності в лінії. Площа поперечного перерізу проводу та втрати потужності в лінії визначаються за такими виразами: $q = I/\delta$; $P_{\Sigma} = I^2 R = \rho l \delta P/U$, оскільки $R = \rho l/q = \rho l/I$, де q — площа поперечного перерізу проводу, мм²; I — сила струму, А; δ — густина струму, А/мм²; P_{Σ} — втрати потужності в лінії електропередачі, Вт; R — опір проводу, Ом; ρ — питомий опір матеріалу проводу, Ом · мм²/м; l — довжина лінії, м; P — потужність, що передається, Вт; U — напруга в лінії електропередачі, В. Отже, якщо передавана потужність не змінюється, площа поперечного перерізу проводу і втрати потужності в лінії обернено пропорційні напрузі.

Електрична енергія виробляється на електростанціях синхронними генераторами при напрузі 11...18 кВ (у деяких випадках при 30...35 кВ). Хоча ця напруга дуже велика для безпосереднього використання її споживачами, проте вона недостатня для економічної передачі електроенергії на великі відстані. Для збільшення напруги застосовують підвищувальні трансформатори.

Приймачі електричної енергії (лампи розжарення, електродвигуни тощо) розраховуються на більш низьку напругу, виходячи з міркувань безпеки для осіб, які користуються цими приймачами. Крім того, для високої напруги потрібна підсилена ізоляція струмоведучих частин, що роблять конструкцію апаратів і приладів дуже складною. Тому високу напругу, при якій передається енергія, не можна безпосередньо використати для живлення приймачів, внаслідок чого до споживачів енергія підводиться через знизувальні трансформатори.

Отже, електрична енергія при передачі її від місця виробництва до місця споживання трансформується три-чотири рази. Крім того, знижувальні трансформатори в розподільних мережах вмикаються одночасно і не завжди на повну потужність, тому потужності встановлених трансформаторів у сім-вісім разів більші від потужності генераторів, які виробляють електроенергію на електростанціях.

Дві ізольовані обмотки трансформатора розміщені на сталевому магнітопроводі. Обмотка, ввімкнена в мережу джерела електричної енергії, називається первинною, а обмотка, від якої енергія подається до приймача, — вторинною.

Напруги первинної і вторинної обмоток неоднакові. Якщо первинна напруга менша від вторинної, то трансформатор називається підвищувальним, якщо ж первинна напруга більша за вторинну, то — знизувальним. Будь-який трансформатор можна використати як підвищувальний, так і знижувальний.

§ 57. ПРИНЦИП ДІЇ ТА БУДОВА ТРАНСФОРМАТОРА

Дія трансформатора ґрунтується на явищі електромагнітної індукції. Якщо первинну обмотку трансформатора ввімкнути в мережу джерела змінного струму, то по ній протікатиме змінний струм, який збудить в осерді трансформатора змінний магнітний потік. Магнітний потік, пронизуючи витки вторинної обмотки трансформатора, індукує в ній ЕРС. Під дією цієї ЕРС по вторинній обмотці і через приймач енергії протікатиме струм. Отже, електрична енергія, трансформуючись, передається з первинного кола у вторинне, але з іншою напругою, на яку розрахований приймач енергії, ввімкнений у вторинне коло.

Щоб поліпшити магнітний зв'язок між первинною та вторинною обмотками, їх розміщують на сталевому магнітопроводі. Для зменшення втрат від вихрових струмів магнітопроводи трансформаторів складають із тонких пластин (завтовшки 0,5 і 0,35 мм) трансформаторної сталі з нанесеною ізоляцією (жаростійким лаком). Трансформаторна сталь може бути гаряче- та холоднокатаною.

У холоднокатаній сталі висока магнітна проникність (більша, ніж у гарячекатаній) у напрямку, що збігається з напрямком прокатування, в той час як поперек прокатування магнітна проникність відносно низька. Тому магнітопроводи з холоднокатаній сталі виготовляють так, щоб магнітні лінії замикалися в напрямку прокатування сталі. Магнітопроводи трансформаторів малої потужності виготовляють з стрічки холоднокатаній сталі.

У трансформаторах великих потужностей магнітопроводи складають зі сталевих штаб. Холоднокатану сталь розрізують так, щоб напрямком магнітних ліній у складеному магнітопроводі збігався з напрямком прокатування сталі. У гарячекатаній сталі магнітна проник-

ність однакова в усіх напрямках і в разі малих потужностей магнітопроводи складають із пластин Ш- або П-подібної форми, які штамнують з листової сталі.

Залежно від форми магнітопроводу та розміщення обмоток на ньому трансформатори можуть бути стержньовими та броньовими. У магнітопроводу стержньового однофазного трансформатора є два стержні, на яких розміщені його обмотки (рис. 74, а). Ці стержні з'єднані ярмом з двох боків так, що магнітний потік замикається по сталі. У магнітопроводу броньового однофазного трансформатора (рис. 74, б) є один стержень, на якому розміщені обмотки трансформатора. Стержень з двох боків охоплюється (бронюється) ярмом так, що обмотка частково захищена магнітопроводом від механічних пошкоджень.

Магнітопроводи з холоднокатаної сталі — стержньові (рис. 74, а) і броньові (рис. 74, б) — виконуються стрічковими.

Трансформатори великої потужності виготовляють стержньовими, оскільки у них простіша, ніж у броньових, ізоляція обмоток вищої напруги від магнітопроводу. У трансформаторах малої потужності напруги обмоток низькі, тому ізолювання їх від магнітопроводу значно спрощується. Трансформатори малої потужності часто виготовляють із броньовим магнітопроводом, у якого один комплект з двома обмотками, в той час як у стержньового — два комплекти.

У броньовому магнітопроводі магнітний потік, виходячи зі стержня, розгалужується на дві однакові частини, причому та частина, що замикається через ярмо, удвічі менша, ніж та, що у стержні; через це переріз ярма передбачають удвічі меншим від перерізу стержня.

Для вимірювальних і лабораторних трансформаторів, а також у разі підвищеної частоти застосовують тороїдні (кільцеподібні) магнітопроводи, перевагами яких є відносно малий магнітний опір і майже повна відсутність зовнішнього потоку розсіяння. За рівномірного розподілу обмоток по обводу тороїда такі трансформатори не чутливі до зовнішніх магнітних полів незалежно від їхнього напрямку. Тороїдні магнітопроводи виготовляють зі стрічки холоднокатаної сталі, а обмотки намотують на спеціальному верстаті цовникового типу.

Обмоткам трансформатора надають переважно форму циліндричних (круглих) котушок, які концентрично нанижують на стержень магнітопроводу. Обмотки такої форми краще витримують радіальні механічні зусилля, що виникають під час роботи трансформатора. У деяких випадках застосовують котушки складнішої форми — прямокутні, овальні та ін. Для малої сили струму обмотки намотують із мідного або алюмінієвого ізолюваного проводу круглого поперечного перерізу, а для великої — прямокутного поперечного перерізу.

Розміщення циліндричних обмоток показано на рис. 75. Ближче до стержня магнітопроводу знаходиться обмотка нижчої напруги (НН), бо її легше ізолювати від магнітопроводу, ніж обмотку вищої напруги (ВН). Обмотку НН ізолюють від магнітопроводу прокладками, рей-

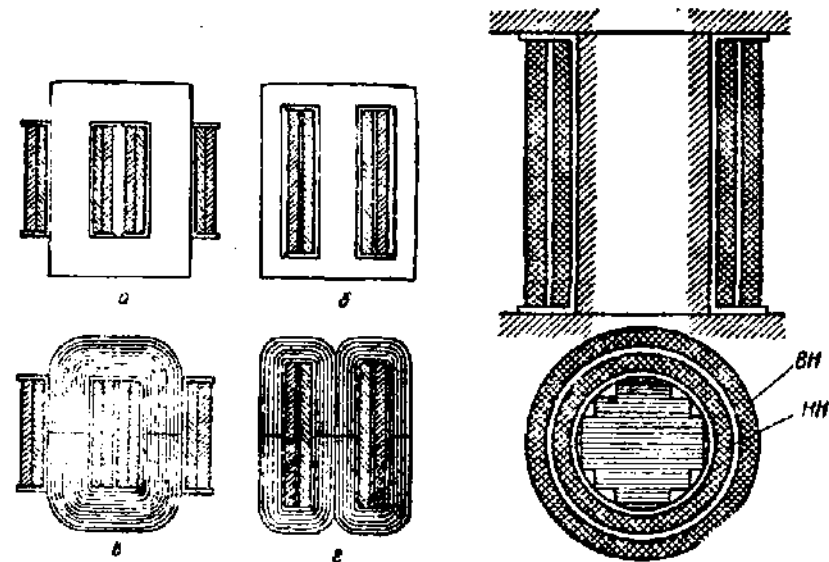


Рис. 74. Магнітопроводи однофазних трансформаторів:

а — стержньовий; б — броньовий; в — стрічковий стержньовий; г — стрічковий броньовий

Рис. 75. Розміщення обмоток потужного трансформатора на магнітопроводі.

ками, шайбами та іншими ізоляційними деталями (частіше з електрокартону). Обмотку ВН ізолюють від обмотки НН.

Якщо обмотки циліндричні, то краще, коли поперечний переріз магнітопроводу має круглу форму, оскільки в цьому випадку у площі, що охоплюється обмотками, не залишається проміжків, не заповнених сталлю. Чим менше незаповнених проміжків, тим менша довжина витків обмоток, отже, менша маса обмотувального проводу при заданій площі поперечного перерізу магнітопроводу. Проте магнітопровід круглого поперечного перерізу не роблять, бо такий магнітопровід треба складати з великої кількості сталевих листів різної ширини. Тому у трансформаторів великої потужності магнітопровід має ступінчастий поперечний переріз з дев'ятьма-десятьма ступенями. Кількість ступенів перерізу осердя обумовлюється кількістю кутів у одній чверті обводу. На рис. 75 магнітопровід має три ступені поперечного перерізу.

Для кращого охолодження у магнітопроводах потужних трансформаторів передбачають охолоджувальні канали у площинах, паралельних площинам сталевих листів і перпендикулярних до цих площин. Охолоджувальні канали влаштовують і в обмотках.

У малопотужних трансформаторів поперечний переріз магнітопроводу має прямокутну форму і обмоткам надають форму прямокут-

них котушок. У разі малих сил струмів радіальні механічні зусилля, що виникають під час роботи трансформатора і діють на обмотки, будуть невеликі, отже, виготовлення обмоток спрощується.

Магнітопровід трансформатора складають встик або внапуск. Якщо встик, то всі частини магнітопроводу складають роздільно з окремих штаб або пластин і потім разом. За такого складання просто виконувати монтаж і демонтаж трансформатора, але в місці стикування треба помістити ізоляційну прокладку, яка збільшує магнітний опір. Пластини ярма точно не збігатимуться із пластинами стержня, внаслідок чого пластини ярма і стержня будуть замкнені. Таке замикання призведе до збільшення вихрових струмів, які обумовлюють високе нагрівання сталі у місці стику. Нагрівання може бути таке високе, що сталеві пластини сплавляться в суцільну масу і трансформатор вийде з ладу.

Якщо магнітопровід складають внапуск, то сталеві пластини укладають так, щоб у штаб, які знаходяться поруч, розрізи були в різних точках. Такий спосіб ускладнює монтаж і демонтаж трансформатора, але й дає змогу значно зменшити магнітний опір, оскільки пластини щільно прилягають одна до одної.

У паспорті трансформатора зазначають його номінальну потужність P , номінальні напруги U_1 і U_2 та сили струмів I_1 і I_2 первинної та вторинної обмоток при повному (номінальному) навантаженні.

Номінальною потужністю трансформатора називається повна потужність, яку віддає його вторинна обмотка при повному (номінальному) навантаженні. Номінальна потужність вимірюється в одиницях повної потужності, тобто у вольт-амперах або кіловольт-амперах. У ватах і кіловатах виражають активну потужність трансформатора, тобто ту потужність, яка може бути перетворена з електричної в механічну, теплову, хімічну, світлову тощо.

Площі перерізу проводів обмоток та всіх частин машини чи будь-якого електричного апарата обумовлюються не активною складовою сили струму чи активною потужністю, а повною силою струму, що протікає по провіднику, отже, повною потужністю.

У трансформаторів малої потужності велика питома поверхня охолодження, тому природного повітряного охолодження для них цілком досить. Для трансформаторів великої потужності передбачають масляне охолодження. Для цього їх поміщають у металеві баки, наповнені мінеральним маслом. Дуже поширене природне охолодження стінок трансформаторного бака. Для збільшення охолоджуваної поверхні в стінки баків вварюють сталеві труби або радіатори.

У процесі експлуатації масло в трансформаторному баці стикається з навколишнім повітрям і зазнає окислення, зволоження та забруднення, внаслідок чого знижується його електрична тривкість. Щоб забезпечити нормальну експлуатацію трансформатора, треба контро-

лювати температуру масла, замінювати його новим, періодично висушувати й чистити. Зміна температури трансформатора призводить до зміни рівня масла. У зв'язку з цим трансформаторні баки забезпечують розширниками. Розширник являє собою циліндричну посудину з листової сталі. Його встановлюють над кришкою бака і з'єднують патрубком. Рівень масла змінюється тільки в розширнику, що дає змогу зменшити площу поверхні масла, яка стикається з повітрям, і запобігти забрудненню та зволоженню масла.

§ 58. РОБОЧИЙ РЕЖИМ ТРАНСФОРМАТОРА

У разі холостого ходу трансформатора (без навантаження) вторинна обмотка його розімкнена, і струм у цій обмотці не протікає. У первинній обмотці при цьому протікає струм холостого ходу силою I_0 , яка набагато менша від сили струму цієї обмотки за номінального навантаження трансформатора. Магніторушійна сила холостого ходу $I_0 \omega_1$ збуджує змінний магнітний потік, який замикається по магнітопроводу й індукуює у первинній та вторинній обмотках електрорушійну силу.

Всяка змінна магнітного потоку, що пронизує будь-який виток, обумовлює індукування в цьому витку ЕРС, яка однакова за значенням і обернена за знаком зміні магнітного потоку в часі. Якщо магнітний потік змінився на $\Delta\Phi$ протягом часу Δt , у витку індукується ЕРС $e = -\Delta\Phi/\Delta t$. Коли $\Delta\Phi$ виражена у веберах, а Δt — у секундах, то ЕРС буде у вольтах. Знак мінус означає напрямок ЕРС, при якому струм, що протікає у витку під її дією, утворює магнітний потік, який перешкоджає зміні основного магнітного потоку. Наприклад, якщо основний магнітний потік збільшується ($\Delta\Phi$ має додатне значення), то струм, що виникає у витку під дією ЕРС, утворює магнітний потік, спрямований назустріч основному магнітному потоку. Якщо ж основний магнітний потік зменшується ($\Delta\Phi$ має від'ємне значення), то струм, що виникає у витку під дією ЕРС, утворює магнітний потік, який збігається за напрямком з основним магнітним потоком.

Обмотки трансформатора мають велику кількість витків: первинна — w_1 , вторинна — w_2 . У кожному витку обох обмоток індукується однакова ЕРС, бо всі витки цих обмоток зчеплені з одним і тим же магнітним потоком. Тому ЕРС кожної обмотки дорівнює сумі ЕРС усіх витків, тобто добуткові кількості витків на ЕРС, що індукується в одному витку:

$$e_1 = -w_1 \Delta\Phi/\Delta t; \quad e_2 = -w_2 \Delta\Phi/\Delta t.$$

Практично магнітний потік у магнітопроводі завжди змінюється в часі синусоїдно: $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ (рис. 76), якщо первинна обмотка трансформатора зв'язана в мережу, напруга якої синусоїдна.

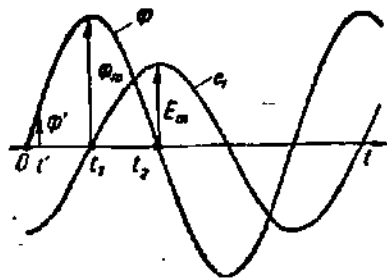


Рис. 76. Криві зміни в часі магнітного потоку в магнітопроводі та ЕРС первинної обмотки трансформатора.

ЕРС в обмотках максимальні, а в момент t_1 вони дорівнюють нулеві.

У проміжку часу від t_1 до t_2 магнітний потік зменшується, тобто приріст від'ємний ($\Delta\Phi < 0$), отже, ЕРС в обмотках додатні. Так можна визначити ЕРС первинної та вторинної обмоток трансформатора у будь-який момент часу. На рис. 76 зображено криву зміни в часі ЕРС первинної обмотки трансформатора e_1 . Аналогічна крива покаже зміну ЕРС вторинної обмотки e_2 , але значення ЕРС e_1 та e_2 у будь-який момент часу різні, через те що обмотки мають неоднакову кількість витків. Найбільшого значення e_1 досягає в моменті часу $t = 0$, t_2 і т. д. Для визначення значення ЕРС виберемо момент t' так, щоб відрізок часу Δt від 0 до t' був дуже малим. Протягом часу Δt магнітний потік зміниться від 0 до Φ' , тобто $\Delta\Phi = \Phi' = \Phi_m \sin \omega t'$. Оскільки ми вибрали дуже малий відтинок часу $\Delta t = t'$, то кут $\omega t'$ також дуже малий, а при малих кутах буде справедливою наближена рівність $\sin \omega t' = \omega t'$.

Отже, найшвидша зміна магнітного потоку в часі $(\Delta\Phi/\Delta t)_{\max} = \Phi'/t' = (\Phi_m \sin \omega t')/t' = \Phi_m \omega$, а найбільша ЕРС первинної обмотки трансформатора $E_{1m} = \omega_1 (\Delta\Phi/\Delta t)_{\max} = \omega_1 \Phi_m \omega = 2\pi f \omega_1 \Phi_m$. Діюче значення ЕРС первинної обмотки $E_1 = E_{1m}/\sqrt{2} = 4,44 \omega_1 f \Phi_m$, бо $2\pi/\sqrt{2} = 4,44$. Кількість витків вторинної обмотки трансформатора відрізняється від кількості витків первинної обмотки, і діюче значення ЕРС вторинної обмотки $E_2 = 4,44 \omega_2 f \Phi_m$.

Оскільки під час холостого ходу у вторинній обмотці струму немає, то напруга на затискачах цієї обмотки дорівнює ЕРС, тобто $U_2 = E_2$. У первинній обмотці протікає струм невеликої сили холостого ходу і напруга цієї обмотки незначно відрізняється від ЕРС, тобто $U_1 \approx E_1$. Відношення напруги на затискачах первинної та вторинної обмоток трансформатора під час холостого ходу (без навантаження) називається коефіцієнтом трансформації і позначається літерою n , тобто $n = U_1/U_2 = E_1/E_2 = \omega_1/\omega_2$; $U_1 = U_2 \omega_1/\omega_2 = n U_2$.

Отже, якщо у трансформаторі первинна та вторинна обмотки мають різну кількість витків, то в разі ввімкнення первинної обмотки в мережу змінного струму з напругою U_1 на затискачах вторинної обмотки виникає напруга U_2 , яка не дорівнює напрузі U_1 .

Якщо вторинну обмотку трансформатора замкнути на будь-який приймач електричної енергії (рис. 77, а), то у вторинному колі про-

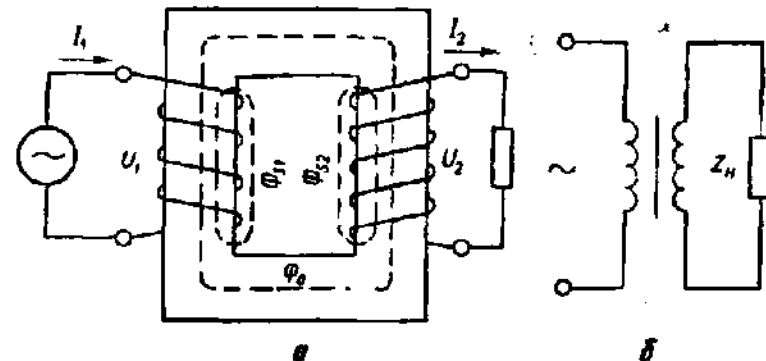


Рис. 77. Схема роботи трансформатора (а) та його умовне позначення (б).

тікати́ме струм силою I_2 , а у первинній обмотці — струм силою I_1 , яку можна подати як геометричну суму сил струмів холостого ходу та навантаження.

Первинна та вторинна обмотки трансформатора електрично не з'єднані. Проте слід мати на увазі, що під дією магнітного зв'язку між цими обмотками зміна сили струму у вторинній обмотці I_2 обумовить відповідну зміну сили струму у первинній обмотці I_1 . Якщо збільшити силу струму у вторинній обмотці, то зросте сила струму і в первинній. Навпаки, зі зменшенням сили струму у вторинній обмотці знизиться сила струму і в первинній. Якщо розімкнути вторинну обмотку, то сила струму в ній дорівнюватиме нулеві, а в первинній обмотці сила струму знизиться до малого значення (сила струму холостого ходу I_0).

У первинній і вторинній обмотках при навантаженні протікають струми неоднакової сили. Якщо знехтувати втратами потужності в трансформаторі, то потужність, яку віддає трансформатор приймачеві енергії $U_2 I_2$, дорівнює потужності, яка споживається з мережі джерела енергії $U_1 I_1$, то $U_2 I_2 = U_1 I_1$; $I_2/I_1 = U_1/U_2 = n$; $I_2 = n I_1$.

Наступучи спадом напруги в опорах первинної обмотки трансформатора, можна припустити, як це було показано вище, що за будь-якого його навантаження абсолютні значення прикладеної напруги U_1 та ЕРС первинної обмотки, що зрівноважує цю напругу, приблизно

однакові, тобто $U_1 = E_1$. На основі цього можна сказати, що за незмінної прикладеної напруги U_1 буде приблизно незмінною і ЕРС E_1 , яка індукується у первинній обмотці трансформатора за будь-якого його навантаження. А оскільки ЕРС E_1 залежить від магнітного потоку Φ_m , то й магнітний потік у магнітопроводі трансформатора за будь-якої зміни навантаження буде приблизно незмінним. Отже, в разі незмінної прикладеної напруги амплітуда магнітного потоку в осерді трансформатора практично незмінна за будь-якої зміни навантаження.

Сила струму I_2 , що протікає у вторинній обмотці при навантаженні трансформатора, утворює свій магнітний потік, який, згідно з законом Ленца, спрямований назустріч магнітному потоку в осерді і прагне його зменшити. Щоб результуючий магнітний потік в осерді залишився незмінним, зустрічний магнітний потік вторинної обмотки має бути зрівноважений магнітним потоком первинної обмотки.

Отже, зі збільшенням сили струму вторинної обмотки зростає розмагнічувальний магнітний потік цієї обмотки й одночасно збільшуються сила струму первинної обмотки I_1 та магнітний потік, утворений цим струмом. Оскільки магнітний потік первинної обмотки зрівноважує розмагнічувальний потік вторинної обмотки, то результуючий магнітний потік в осерді буде незмінним.

У знижувальному трансформаторі напруга первинної обмотки U_1 більша від напруги вторинної обмотки U_2 в n разів, і сила струму вторинної обмотки I_2 більша від сили струму первинної обмотки I_1 також у n разів. У підвищувальному трансформаторі існує протилежне співвідношення між напругами обмоток і між силами струмів у них.

Отже, у обмотці з вищою напругою сила струму менша, ніж у обмотці з нижчою напругою. У обмотці з вищою напругою більша кількість витків; її намотують з проводу з меншою площею поперечного перерізу, ніж обмотку з нижчою напругою.

Під час роботи трансформатора під навантаженням у його первинній і вторинній обмотках протікають струми, що утворюють потоки розсіяння Φ_{s1} та Φ_{s2} . Ці магнітні потоки зчеплені тільки з витками тієї обмотки, струмом якої вони утворюються, і завжди набагато менші, ніж основний магнітний потік Φ_m , який замкається по магнітопроводу трансформатора (по сталі), оскільки потоки розсіяння в основному проходять у немагнітному середовищі. Потоки розсіяння індукують в обмотках ЕРС розсіяння, які незначною мірою змінюють напругу вторинної обмотки трансформатора в разі зміни його навантаження. Умовне позначення трансформатора наведено на рис. 77, б.

Щоб не встановлювати окремого трансформатора на кожну роботу напругу, доцільно на одному трансформаторі влаштовувати кілька вторинних обмоток з різною кількістю витків. Такі трансформатори, що звуться багатобмотковими, широко застосовують у

радіоприймачах, телевізорах, підсилювачах та іншій апаратурі, яка потребує для живлення кілька різних змінних напруг. Співвідношення кількості витків у обмотках обумовлюється їхньою напругою: $w_2/w_1 = U_2/U_1$; $w_3/w_1 = U_3/U_1$ і т. д.

Сила струму в первинній обмотці дорівнює сумарній силі струму всіх вторинних обмоток: $I_1 = I_2 U_2 / U_1 + I_3 U_3 / U_1 + \dots$

Зміна сили струму у будь-якій вторинній обмотці обумовлює відповідну зміну сили струму первинної обмотки. При цьому дещо змінюються напруги всіх вторинних обмоток трансформатора, тобто напруга будь-якої вторинної обмотки залежить від сили струму як у цій обмотці, так і в будь-якій іншій вторинній обмотці трансформатора.

§ 59. ТРИФАЗНІ ТРАНСФОРМАТОРИ

Трифазні трансформатори виготовляють головним чином стержньовими. Схему побудови магнітопроводу трифазного стержньового трансформатора наведено на рис. 78, а. Три однакові однофазні трансформатори виконані так, що їхні первинні і вторинні обмотки розміщені на одному стержні кожного магнітопроводу, а другий стержень без обмотки. Якщо ці три трансформатори розмістити так, щоб стержні без обмоток знаходилися поруч, то три стержні можна об'єднати в один (рис. 78, б). Через об'єднаний стержень замкнуться магнітні потоки трьох однофазних трансформаторів, які однакові за амплітудою і зсунуті за фазою на третину періоду. Оскільки сума трьох однакових за амплітудою і зсунутих за фазою на третину періоду магнітних потоків дорівнює нулеві у будь-який момент часу ($\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$), то в об'єднаному стержні магнітного потоку немає і потреба в цьому стержні відпадає. Отже, для магнітопроводу досить мати три стержні, які з конструктивних міркувань розміщуються в одній площині (рис. 78, в). На кожному стержні трифазного трансформатора розміщуються обмотки вищої й нижчої напруг однієї фази. Стержні з'єднуються між собою ярмом зверху і знизу. Довжина магнітних ліній потоку середнього стержня менша, ніж крайніх стерж-

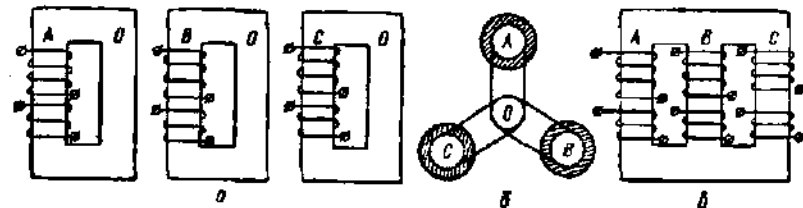


Рис. 78. Схема побудови трансформатора:

а — три однофазні трансформатори; б — три однофазні трансформатори, об'єднані в один магнітопровід; в — схеми трифазного стержньового трансформатора.

сформатори виконані так, що їхні первинні і вторинні обмотки розміщені на одному стержні кожного магнітопроводу, а другий стержень без обмотки. Якщо ці три трансформатори розмістити так, щоб стержні без обмоток знаходилися поруч, то три стержні можна об'єднати в один (рис. 78, б). Через об'єднаний стержень замкнуться магнітні потоки трьох однофазних трансформаторів, які однакові за амплітудою і зсунуті за фазою на третину періоду. Оскільки сума трьох однакових за амплітудою і зсунутих за фазою на третину періоду магнітних потоків дорівнює нулеві у будь-який момент часу ($\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$), то в об'єднаному стержні магнітного потоку немає і потреба в цьому стержні відпадає. Отже, для магнітопроводу досить мати три стержні, які з конструктивних міркувань розміщуються в одній площині (рис. 78, в). На кожному стержні трифазного трансформатора розміщуються обмотки вищої й нижчої напруг однієї фази. Стержні з'єднуються між собою ярмом зверху і знизу. Довжина магнітних ліній потоку середнього стержня менша, ніж крайніх стерж-

нів, отже, магнітний потік середнього стержня зустрічає на своєму шляху менший магнітний опір, ніж магнітні потоки крайніх стержнів. Тому у фазі, обмотка якої розміщена на середньому стержні, протікає намагнічувальний струм меншої сили, ніж у фазах, обмотки яких розміщені на крайніх стержнях.

Конструктивно обмотки трифазних трансформаторів виконують так само, як і однофазних. Початки фаз обмотки вищої напруги позначаються великими літерами A, B, C , а кінці фаз — X, Y, Z . Якщо обмотка вищої напруги має виведену нульову точку, то цей затискач позначають цифрою 0. Початки фаз обмотки нижчої напруги позначають малими літерами a, b, c , а кінці фаз — x, y, z ; вивід нульової точки — 0.

Обмотки трифазних трансформаторів можуть бути з'єднані зіркою або трикутником. У разі з'єднання обмоток зіркою кінці (або початки) трьох фаз з'єднуються у спільній точці, утворюючи нейтральну або нульову точку, а вільні затискачі початків (або кінців) трьох фаз приєднуються до трьох проводів мережі джерела (або приймача) електричної енергії змінного струму. У разі з'єднання обмоток трикутником початок першої фази з'єднується з кінцем другої, початок другої фази — з кінцем третьої, початок третьої фази — з кінцем першої. Точки з'єднання початку однієї фази з кінцем іншої приєднуються до проводів трифазної мережі змінного струму.

З'єднання обмоток трифазних трансформаторів зіркою позначається Y , а трикутником Δ . Якщо обмотка з'єднана зіркою і має виведену нульову точку, то таке з'єднання позначається Y .

Групи трифазних трансформаторів позначаються знаками такого вигляду: $Y/Y-0; Y/\Delta-11$ і т. д., де знак перед косою лінією означає схему з'єднання обмотки вищої напруги, знак після косої лінії — схему з'єднання обмотки нижчої напруги, цифра — кут між векторами лінійних ЕРС обмоток вищої й нижчої напруг, виражений у кутових одиницях, кратних 30° . Так, перше позначення групи показує, що обмотки вищої і нижчої напруг з'єднані зіркою, причому обмотка нижчої напруги має виведену нульову точку, і кут між векторами лінійних ЕРС обмоток вищої і нижчої напруг дорівнює $0 \cdot 30^\circ$, тобто 0° .

Групи трифазних трансформаторів залежать від схем з'єднання обмоток, позначення затискачів фаз обмоток вищої й нижчої напруг та від їх напрямку. Якщо напрямки витків обмоток вищої й нижчої напруг однакові, то ЕРС, що індуються у фазах обмоток вищої й нижчої напруг, збігаються за фазою; якщо ж у обмоток зустрічні напрямки, то ЕРС фаз вищої й нижчої напруг перебувають у протифазі.

В Україні застосовуються такі стандартні групи трифазних трансформаторів:

$Y/Y-0; Y/\Delta-11; Y/\Delta-11$

У стандартних схемах обмотки вищої напруги з'єднані зіркою, оскільки за такої схеми фазна напруга в $\sqrt{3}$ разів менша від лінійної, завдяки чому спрощується ізоляція обмоток. Обмотки нижчої напруги частіше з'єднуються трикутником, бо за такого з'єднання трансформатор менш чутливий до несиметрії фазного навантаження. Обмотки нижчої напруги з'єднуються також зіркою з нулем; за такої схеми у чотирипроводній мережі можна одержати дві різні напруги — лінійну і фазну (наприклад, 127 і 220 В; 220 і 380 В і т. д.). Для збільшення потужності трансформаторної підстанції та для спрощення резерву використовують паралельне приєднання трансформаторів, однією з неодмінних умов якого є належність їх до однакових груп.

§ 60. ДОСЛІД ХОЛОСТОГО ХОДУ Й КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Для випробування трансформатора проводять дослід холостого ходу й дослід короткого замикання. Під час проведення дослідів холостого ходу (рис. 79, а) вторинна обмотка трансформатора розімкнена

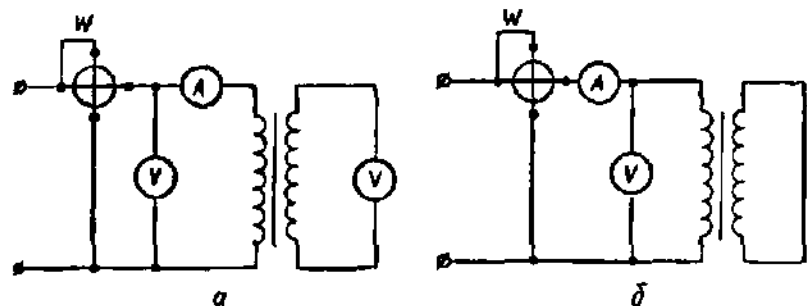


Рис. 79. Схема дослідів холостого ходу (а) та короткого замикання (б) трансформатора.

і струму в ній немає ($I_2 = 0$). Якщо первинну обмотку трансформатора ввімкнути в мережу джерела електричної енергії змінного струму, то в цій обмотці протікатиме струм холостого ходу силою I_0 . У трансформаторах великої потужності сила струму холостого ходу може становити 5...10 % номінальної сили струму. У трансформаторах малих потужностей сила цього струму досягає 25...30 % номінальної.

Струм холостого ходу утворює магнітний потік у магнітопроводі трансформатора. Для збудження магнітного потоку трансформатор споживає реактивну потужність із мережі. Що стосується активної потужності, то вона витрачається на покриття втрат потужності в магнітопроводі, обумовлених гістерезисом та вихровими струмами. Оскільки реактивна потужність під час холостого ходу трансформатора значно більша від активної потужності, то його коефіцієнт потужності $\cos \phi$ надзвичайно малий і становить 0,2...0,3.

У разі короткого замикання вторинної обмотки опір трансформатора дуже малий і сила струму короткого замикання в багато разів більша від номінальної. Така велика сила струму обумовлює сильне нагрівання обмоток трансформатора і призводить до виходу його з ладу. Тому трансформатор обладнують системою захисту, яка вимикає його в разі короткого замикання.

Під час дослідів короткого замикання (рис. 79, б) вторинна обмотка трансформатора замкнена накоротко, тобто напруга на затискачах вторинної обмотки дорівнює нулеві. Первинна обмотка вмикається в мережу з такою зниженою напругою, за якої сили струмів у обмотках дорівнюють номінальним. Така знижена напруга називається напругою короткого замикання u_k і виражається в процентах від номінального значення.

Активний, реактивний і повний опори короткого замикання трансформатора визначаються за такими виразами:

$$R_k = P_k / I^2; \quad Z_k = U_k / I; \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2},$$

де U_k , I і P_k — напруга, сила струму і потужність, які показують вимірювальні прилади, ввімкнені в коло первинної обмотки трансформатора.

Якщо випробовують трифазний трансформатор, то в наведені вище формули підставляють фазні значення напруги, сили струму й потужності.

Напруга короткого замикання та її активна й реактивна складові становлять:

$$u_k = I_n Z_k / U_n \cdot 100; \quad u_a = I_n R_k / U_n \cdot 100; \\ u_x = I_n X_k / U_n \cdot 100,$$

де U_n та I_n — номінальні напруга й сила струму первинної обмотки трансформатора.

§ 61. ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРІВ ЗА ДАНИМИ ДОСЛІДІВ ХОЛОСТОГО ХОДУ Й КОРТКОГО ЗАМИКАННЯ

Властивості трансформатора при роботі його під навантаженням можна визначити безпосереднім його випробуванням. Якщо трансформатор ввімкнути на певне навантаження і змінювати це навантажен-

ня, то за показами приладів можна простежити, як змінюватиметься напруга на затискачах вторинної обмотки та ККД трансформатора. Проте під час випробування трансформатора під навантаженням відбувається дуже велика витрата електроенергії (тим більша, чим вища потужність трансформатора), і для утворення активного, індуктивного та ємнісного навантажень потрібне громіздке обладнання (реостати, індуктивні котушки та конденсатори). Крім того, безпосереднє випробування трансформатора дає дуже неточні результати.

Робочі властивості трансформатора можна визначити за даними дослідів холостого ходу й короткого замикання. При цьому потрібна порівняно невелика витрата енергії, відповідає потреба у громіздкому обладнанні, крім того, значно підвищується точність вимірювань порівняно з безпосереднім випробуванням.

За даними дослідів холостого ходу вимірюють напругу первинної і вторинної обмоток U_1 і U_2 , силу струму холостого ходу I_0 і споживану при холостому ході потужність P_0 , яка витрачається на покриття втрат у сталі магнітопроводу ($P_0 = P_{ст}$).

У процесі дослідів короткого замикання вимірюють напругу короткого замикання U_k , силу струму первинної обмотки, яка дорівнює номінальній I_n , потужність P_k , споживану трансформатором під час дослідів короткого замикання і витрачувану на покриття втрат у обмотках за номінального навантаження ($P_k = P_{ом}$), опори (повний, активний і реактивний) трансформатора при короткому замиканні Z_k , R_k і X_k , а також відносні значення напруги короткого замикання u_k , її активної u_a та реактивної u_x складових.

За даними дослідів холостого ходу й короткого замикання можна визначити напругу на затискачах вторинної обмотки та ККД трансформатора для будь-якого навантаження.

Зниження вторинної напруги у процентах для будь-якого навантаження становить

$$\Delta u = [(U_{20} - U_2) / U_{20}] \cdot 100 = \beta (u_a \cos \phi_2 + u_x \sin \phi_2),$$

де $\beta = I / I_n$ — коефіцієнт навантаження; I — сила струму при вибраному навантаженні; ϕ_2 — зсув за фазою між напругою та силою струму вторинної обмотки.

Напруга вторинної обмотки при навантаженні $U_2 = U_{20} (1 - \Delta u / 100)$, де U_{20} — напруга при холостому ході.

Отже, напруга вторинної обмотки залежить не тільки від величини, але й від характеру навантаження.

Якщо навантаження має індуктивний характер, то напруга знижується зі зростанням навантаження більшою мірою, ніж у випадку, коли навантаження чисто активне. Якщо навантаження ємнісне, то напруга підвищується зі збільшенням навантаження. Беручи певні значення β і ϕ_2 , можна визначити Δu та U_2 для будь-якого навантаження трансформатора, не випробовуючи його під навантаженням.

Коефіцієнтом корисної дії (ККД), або відат-
кстю трансформатора називається відношення корисної
потужності трансформатора P_2 до потужності, споживаної ним із
мережі джерела електричної енергії, P_1 , тобто $\eta = P_2/P_1$.

Споживана потужність P_1 завжди буде більшою від корисної по-
тужності P_2 , бо під час роботи трансформатора відбуваються втрати
перетворюваної ним енергії. Втрати у трансформаторі складаються
із втрат у сталі магнітопроводу $P_{ст}$ та втрат у обмотках $P_{обм}$. Отже,
споживану трансформатором потужність можна виразити так: $P_1 =$
 $= P_2 + P_{ст} + P_{обм}$.

Корисна потужність однофазного трансформатора $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$,
трифазного $P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2$.

Отже, ККД одно- і трифазного трансформаторів можна визначити
за такими формулами:

$$\eta_{1\phi} = U_2 I_2 \cos \varphi_2 / (U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{ст} + P_{обм});$$

$$\eta_{3\phi} = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 / (\sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{ст} + P_{обм}).$$

ККД трансформатора буде найбільшим при навантаженні, для
якого втрати у сталі дорівнюють втратам у обмотках. У сучасних
трансформаторів ККД дуже високий і досягає при повному наван-
таженні 95...99,5 %.

Беручи певні значення корисної потужності P_2 (наприклад, 0;
25; 50; 75; 100; 125 % номінальної потужності), для кожного з вибра-
них значень визначають втрати у трансформаторі.

Втрати в сталі магнітопроводу $P_{ст}$ залежать від марки сталі,
з якої виготовлено осердя, від частоти струму в мережі та магнітної
індукції в магнітопроводі. Оскільки частота струму в мережі й маг-
нітна індукція залишаються незмінними під час роботи трансформато-
ра, то і втрати в сталі не залежать від навантаження і залишаються
сталими.

Втрати в обмотках ідуть на нагрівання провідників цих обмоток
струмами, що протікають до них, і прямо пропорційні силі струму
у квадраті. Отже, при навантаженні 0,5 номінального сили струмів у
обмотках будуть вдвічі, а втрати в обмотках у чотири рази меншими,
ніж при номінальному навантаженні. Беручи певні значення $\cos \varphi_2$,
визначають ККД для будь-якого навантаження трансформатора.

§ 61. АВТОТРАНСФОРМАТОРИ

У конструктивному відношенні автотрансформатор подібний до
трансформатора: на сталевому магнітопроводі розміщені дві обмот-
ки з провідників різного поперечного перерізу. Кінець однієї обмот-
ки електрично з'єднаний з початком другої так, що дві послідовно
з'єднані обмотки утворюють загальну обмотку вищої напруги. Об-
моткою нижчої напруги, яка є частиною обмотки вищої напруги,

служить одна з двох обмоток автотрансформатора. Отже, між обмот-
ками вищої й нижчої напруги автотрансформатора існує не тільки
магнітний, але й електричний зв'язок.

Принципову схему знижувального автотрансформатора наведе-
мо на рис. 80. Первинну напругу підведено до затискачів $A - X$ пер-
винної обмотки з кількістю витків w_1 .
Вторинною обмоткою є частина первин-
ної $a - X$ з кількістю витків w_2 .

За холостого ходу $I_2 = 0$. Нехтуючи
спадом напруги в опорах первинної
обмотки, можна записати рівняння рів-
новаги ЕРС для первинної та вторинної
обмоток у такому вигляді: $U_1 = E_1 =$
 $= 4,44 w_1 f \Phi_m$; $U_2 = E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_m$.

Відношення напруги первинної і
вторинної обмоток за холостого ходу
називається коефіцієнтом
трансформації автотранс-
форматора, тобто $U_1/U_2 = w_1/w_2 =$
 $= n$.

Якщо вторинну обмотку автотрансформатора замкнути на при-
ймач енергії, то у вторинному колі протікатиме струм силою I_2 . Нех-
туючи втратами енергії, потужність, споживану автотрансформатором
і мережі, можна вважати такою, що дорівнює потужності, яку він
віддає у вторинну мережу: $P = U_1 I_1 = U_2 I_2$, звідки $I_1/I_2 = w_2/w_1 =$
 $= 1/n$.

Отже, основні співвідношення трансформатора залишаються без
зміни в автотрансформаторах.

У спільній для мереж вищої і нижчої напруг частині обмотки $a -$
 $- X$ протікають струми силою I_1 та I_2 , спрямовані назустріч один
одному. Якщо знехтувати струмом холостого ходу, значення сили
якого надто мале, то можна вважати, що сили струмів I_1 та I_2 зсупу-
ті за фазою на 180° і сила струму I_{12} в частині обмотки $a - X$ до-
рівнює арифметичній різниці між силами струмів вторинної і первин-
ної мереж, тобто $I_{12} = I_2 - I_1 = I_2 (1 - 1/n)$.

У знижувальному автотрансформаторі сила струму I_{12} збігається
за напрямком із силою струму I_2 , а в підвищувальному I_{12} спрямова-
на протилежно до сили струму I_2 .

Перевагами автотрансформатора перед трансформатором тієї ж ко-
рисної потужності є менша витрата активних матеріалів — обмотко-
вого проводу і сталі, нижчі втрати енергії, вищий ККД, менша зміна
напруги в разі зміни навантаження.

Маса обмоткового проводу автотрансформатора менша від маси
обмоткового проводу трансформатора за однакової густини струму.
Це пояснюється тим, що у трансформатора на магнітопроводі є дві

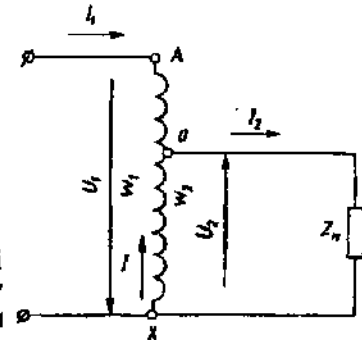


Рис. 80. Схема знижувального автотрансформатора.

обмотки — первинна з кількістю витків w_1 , поперечний переріз про-
воду якої розрахований на силу струму I_1 , і вторинна з кількістю
витків w_2 , поперечний переріз проводу якої розрахований на силу
струму I_2 . Автотрансформатор також має дві обмотки, але витки од-
нієї з них (частина $A - a$) кількістю ($w_1 - w_2$) із проводу, поперечний
переріз якого розрахований на силу струму I_1 , а витки другої (части-
на $a - X$) кількістю w_2 — із проводу, поперечний переріз якого роз-
рахований на різницю між силами струмів $I_{12} = I_2 - I_1$.

Поперечний переріз і маса сталі магнітопроводу в автотрансфор-
маторі також менші, ніж у трансформаторі. Це пояснюється тим, що
у трансформаторі енергія з первинної мережі у вторинну передається
магнітним шляхом внаслідок електромагнітного зв'язку між обмотка-
ми. В автотрансформаторі енергія з первинної мережі у вторинну
частково передається електричним шляхом, тобто електричним з'єд-
нанням первинної та вторинної мереж. Оскільки в процесі передачі
цієї енергії магнітний потік участі не бере, електромагнітна потуж-
ність автотрансформатора менша, ніж трансформатора.

Корисна потужність автотрансформатора за активного наванта-
ження становить $P_2 = U_2 I_2$. Якщо на увазі, що $I_2 = I_1 + I_{12}$, ді-
станемо $P_2 = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = P_e + P_m$, де P_m — електромагнітна по-
тужність автотрансформатора, яка обумовлює потрібний магнітний
потік, площу поперечного перерізу та масу сталі магнітопроводу. Ця
потужність є розрахунковою, або габаритною потужністю авто-
трансформатора.

Поряд з перевагами, автотрансформатори мають і суттєві недолі-
ки: малий опір короткого замикання, що обумовлює велику кратність
сили струму короткого замикання; можливість потрапляння вищої
напруги в мережу нижчої напруги внаслідок електричного зв'язку
між цими мережами. Наявність електричного зв'язку між мережами
джерела і приймача енергії унеможливує застосування автотрансфор-
матора у тому випадку, коли у приймача енергії є заземлений полюс
(у випрямних пристроях).

Переваги автотрансформаторів будуть виражені тим дужче, чим
більше наблизиться до одиниці коефіцієнт трансформації. Тому
автотрансформатори застосовують при невеликих коефіцієнтах транс-
формації ($n = 1...2$).

У трифазних мережах використовують автотрансформатори, об-
мотки яких з'єднуються зіркою.

§ 63. ВИМІРЮВАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ

Вимірювальні трансформатори поділяються на трансформатори
напруги та трансформатори сили струму. Їх застосовують у колах
змінного струму для розширення меж вимірювання вимірювальних

приладів та для ізоляції цих приладів від струмопровідних частин,
що перебувають під високою напругою.

Трансформатори напруги конструктивно являють собою звичайні
трансформатори малої потужності. Первинна обмотка такого транс-
форматора вмикається у два лінійні проводи мережі, напруга якої
вимірюється або контролюється; у вторинну обмотку вмикають вольт-
метр або паралельну обмотку ватметра, лічильника тощо. Коефіці-
єнт трансформації трансформатора напруги вибирають таким, щоб
за номінальної первинної напруги напруга вторинної обмотки стано-
вила 100 В.

Режим роботи трансформатора напруги аналогічний режимові хо-
лостого ходу звичайного трансформатора, оскільки опір вольтметра
або паралельної обмотки ватметра, лічильника і т. д. великий і силою
струму у вторинній обмотці можна знехтувати. Ввімкнення у вторинну
обмотку великої кількості вимірювальних приладів небажане. Якщо
паралельно вольтметру, ввімкненому у вторинну обмотку трансформа-
тора, приєднати ще один вольтметр або паралельну обмотку ватметра,
лічильника і т. д., то сила струму у вторинній обмотці трансформато-
ра збільшиться, що обумовить спад напруги на затискачах вторинної
обмотки, і точність показів приладів знизиться.

Трансформатори сили струму служать для перетворення змінного
струму. Їх виготовляють такими, щоб при великій номінальній силі
струму первинного кола сила струму у вторинній обмотці становила
5 А. Первинна обмотка трансформатора сили струму вмикається в
розріз лінійного проводу (послідовно з навантаженням), сила струму
в якому вимірюється; вторинна обмотка замкнена на амперметр або на
послідовну обмотку ватметра, лічильника тощо, тобто на вимірюваль-
ний прилад з малим опором.

Режим роботи трансформатора сили струму суттєво відрізняється від
режиму роботи звичайного трансформатора. У звичайному трансфор-
маторі в разі зміни навантаження магнітний потік в осерді залиша-
ється практично незмінним, якщо постійно прикладено напругу. Якщо
у звичайному трансформаторі зменшити навантаження, тобто силу
струму у вторинній обмотці, то і в первинній обмотці сила струму змен-
шиться, і якщо вторинну обмотку розімкнути, то сила струму у пер-
винній обмотці знизиться до сили струму холостого ходу I_0 .

Під час роботи трансформатора сили струму його вторинна обмот-
ка замкнена на вимірювальний прилад з малим опором і режим ро-
боти трансформатора наближається до короткого замикання. Тому
в магнітопроводі трансформатора магнітний потік малий. Якщо ро-
зімкнути вторинну обмотку трансформатора сили струму, то струму
в цій обмотці не буде, в той час як у первинній обмотці сила струму
залишається незмінною.

Отже, якщо вторинна обмотка трансформатора сили струму
розімкнена, то магнітний потік у магнітопроводі, який збуджений

струмом первинної обмотки і не зустрічає розмагнічувальної дії струму вторинної обмотки, та ЕРС вторинної обмотки будуть дуже великими, що небезпечно для цілості ізоляції цієї обмотки та для обслуговуючого персоналу. Тому при вимкненні вимірювальних приладів із вторинної обмотки трансформатора сили струму цю обмотку треба замкнути накоротко.

Ввімкнення великої кількості вимірювальних приладів у вторинну обмотку трансформатора сили струму знижує точність вимірювання.

Конструкції трансформаторів сили струму залежно від призначення надзвичайно різноманітні й поділяються на стаціонарні та переносні.

Під час роботи вимірювальних трансформаторів напруги й сили струму можливий пробій ізоляції їхніх первинних обмоток і, як наслідок, електричне з'єднання первинної обмотки з магнітопроводом або з вторинною обмоткою. Для безпеки обслуговування магнітопроводи та вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів заземлюють. Умовне позначення вимірювальних трансформаторів наведено на рис. 81.

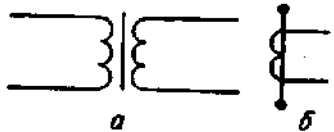


Рис. 81. Умовне позначення вимірювальних трансформаторів:

а — напруги; б — сили струму.

Контрольні запитання

1. Поясніть призначення та принцип дії трансформаторів.
2. Яку форму мають магнітопроводи однофазних трансформаторів?
3. Яким виразом визначається діюче значення ЕРС обмотки трансформатора?
4. Що називається коефіцієнтом трансформації?
5. Поясніть будову й роботу автотрансформатора.

Розділ VII. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ

§ 64. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Електричні машини широко застосовують на електричних станціях, у промисловості, на транспорті, в авіації, в системах автоматичного регулювання та керування, у побуті. Вони перетворюють механічну енергію в електричну і, навпаки, електричну енергію в механічну. Машина, що перетворює механічну енергію в електричну, називається генератором. Перетворення електричної енергії в механічну здійснюється двигуном.

Будь-яку електричну машину можна використати як генератор і як двигун. Ця властивість її змішувати напрямком перетворюваної нею

енергії називається оборотністю машини. Її можна також використати для перетворення електричної енергії одного роду струму (частоти, кількості фаз змінного струму, напруги постійного струму) в енергію іншого роду струму. Такі електричні машини називаються перетворювачами.

Електричні машини залежно від роду струму електроустановки, в якій вони мають працювати, поділяються на машини постійного і машини змінного струму. Машини змінного струму можуть бути одно- та багатофазними. Найширше застосовуються трифазні синхронні та асинхронні машини, а також колекторні машини змінного струму, які дають змогу здійснювати економічне регулювання частоти обертання в широких межах.

Принцип дії електричної машини ґрунтується на використанні законів електромагнітної індукції та електромагнітних сил. Якщо в магнітне поле полюсів постійних магнітів або електромагнітів (рис. 82) помістити провідник і під дією певної сили F_1 переміщувати його перпендикулярно до магнітних ліній, то в ньому виникне електрорушійна сила $E = Blv$, де B — магнітна індукція в місці, де перебуває провідник; l — активна довжина провідника (тієї його частини, що знаходиться в магнітному полі); v — швидкість переміщення провідника у магнітному полі. Напрямок ЕРС (на рисунку від глядача за площину креслення), що індукується у провіднику, визначається згідно з правилом правої руки.

Якщо цей провідник замкнути на приймач енергії то у замкненому колі під дією ЕРС протікатиме струм, напрямок якого збігається з напрямком ЕРС у провіднику. Внаслідок взаємодії струму в провіднику з магнітним полем полюсів утворюється електромагнітна сила F_2 , напрямок якої визначається за правилом лівої руки. Ця сила буде спрямована назустріч силі, яка переміщує провідник у магнітному полі. Якщо $F_1 = F_2$, провідник переміщуватиметься зі сталою швидкістю. Отже, у такій найпростішій електричній машині механічна енергія, що витрачається на переміщення провідника, перетворюється в електричну енергію, яка віддається опоріві зовнішнього приймача енергії, тобто машина працює генератором. Та ж найпростіша електрична машина може працювати і двигуном. Якщо від стороннього джерела електричної енергії через провідник пропустити струм, то внаслідок взаємодії струму у провіднику з магнітним полем полюсів утворюється електромагнітна сила F_2 , під дією якої провідник почне переміщуватися в магнітному полі, долаючи силу гальмування будь-якого механічного приймача енергії.

Для збільшення ЕРС та електромеханічних сил електричні маши-

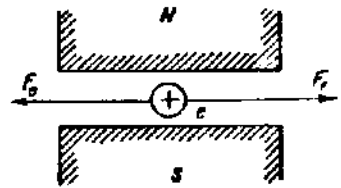


Рис. 82. Схема, що пояснює принцип дії електричної машини.

ни мають обмотки, що складаються з великої кількості проводів, які з'єднуються між собою так, щоб ЕРС у них мали однаковий напрямок і додавались. У провіднику ЕРС буде індукована і в тому разі, коли провідник нерухомий, а переміщується магнітне поле полюсів.

§ 65. ПРИНЦИП ДІЇ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Найпоширенішим з електричних двигунів є трифазний асинхронний двигун, вперше сконструйований відомим російським електриком М. О. Доліво-Добровольським.

Асинхронний двигун відзначається простою конструкцією та нескладністю обслуговування. Як і будь-яка машина змінного струму, асинхронний двигун складається з двох основних частин — статора і ротора. Статором називається нерухома частина машини, ротором — її обертова частина. Властивістю асинхронної машини є її оборотність, тобто вона може бути використана в режимі генератора і в режимі двигуна. Через ряд суттєвих недоліків асинхронні генератори майже не застосовуються, в той час як асинхронні двигуни набули великого поширення.

Багатофазна система змінного струму утворює обертове магнітне поле, частота обертання якого $n_1 = 60f_1/p$. Якщо частота обертання ротора дорівнює частоті обертання магнітного поля ($n_2 = n_1$), то така частота називається синхронною. Якщо ж частота обертання ротора не дорівнює частоті обертання магнітного поля ($n_2 \neq n_1$), то така частота називається асинхронною.

У асинхронному двигуні робочий процес протікатиме тільки за асинхронної частоти, тобто коли частота обертання ротора не дорівнює частоті обертання магнітного поля. Частота обертання ротора може мало чим відрізнитися від частоти обертання поля, але під час роботи двигуна вона завжди буде менша ($n_2 < n_1$).

Робота асинхронного двигуна ґрунтується на явищі, що називається «диск Араго — Ленца» (рис. 83). Це явище полягає ось у чому: якщо перед полюсами постійного магніту помістити мідний диск 1, який вільно сидить на осі 2, й обертати магніт навколо його осі за допомогою рукоятки 3, то мідний диск обертатиметься у тому ж напрямку.

Це пояснюється тим, що під час обертання магніта його магнітне поле пронизує диск і індукуює в ньому вихрові струми. Внаслідок взаємодії вихрових струмів з магнітним полем магніту виникає сила, яка приводить диск в обертання. На основі закону Ленца напрямок

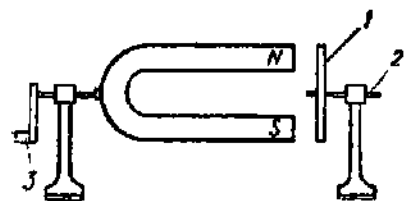


Рис. 83. Схема, що пояснює принцип дії асинхронного двигуна.

будь-якого індукованого струму такий, що він протидіє причині, яка його викликала. Тому вихрові струми в тілі диска прагнуть затримати обертання магніту, але не маючи можливості зробити це, приводять диск в обертання так, що він обертається слідом за магнітом. При цьому частота обертання диска завжди менша, ніж частота обертання магніту. Якби ці частоти з якоїсь причини стали однаковими, то магнітне поле не переміщувалось би відносно диска, а отже, в ньому не виникали б вихрові струми, тобто не було б сили, під впливом якої диск обертається.

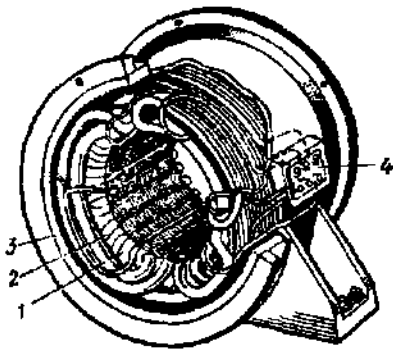
У асинхронних двигунів постійне магнітне поле замінене обертовим магнітним полем, яке утворює трифазна система, зв'язана в мережу змінного струму. Обертове магнітне поле статора перетинає провідники обмотки ротора й індукуює в них ЕРС. Якщо обмотка ротора замкнена на якийсь опір або накоротко, то по ній під дією індукованої ЕРС протікає струм. Внаслідок взаємодії струму в обмотці ротора з обертовим магнітним полем обмотки статора утворюється обертаючий момент, під дією якого ротор починає обертатися за напрямком обертання магнітного поля.

Отже, для зміни напрямку обертання ротора, тобто для реверсування двигуна, потрібно змінити напрямок обертання магнітного поля, утвореного статорною обмоткою. Це досягається зміною чергування фаз статорних обмоток, для чого слід поміняти місцями відносно затискачів мережі будь-які два із трьох проводів, які з'єднують обмотку статора з мережею. Реверсивні двигуни обладнуються перемикачами, за допомогою яких можна змінювати чергування фаз статорних обмоток, а отже, і напрямок обертання ротора.

Якщо припустити, що в певний момент часу частота обертання ротора дорівнює частоті обертання статорного поля, то провідники роторної обмотки не перетинатимуть магнітного поля статора і струму в роторі не буде. У цьому разі обертаючий момент дорівнюватиме нулеві і частота обертання ротора зменшиться порівняно з частотою обертання статорного поля, доки не виникне обертаючий момент, що тривіноважує гальмівний момент, який складається з моменту навантаження на валі і моменту сил тертя в машині.

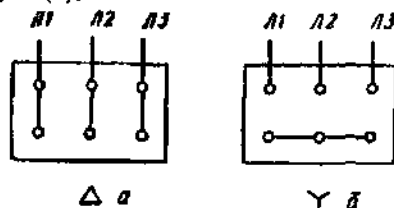
§ 66. БУДОВА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Осердя статора 1 (рис. 84) набирають зі сталевих пластин завтовшки 0,35 або 0,5 мм. Пластини штампують із западинами (пазами), ізолюють лаком або окалиною для зменшення втрат на вихрові струми, складають в окремі пакети і закріплюють у станині двигуна 3. До станини прикріплюють також бічні щити з розміщеними на них підшипниками, на які спирається роторний вал. Станину встановлюють на фундаменті. У поздовжній пазі статора вкладають провідники його обмотки 2, які відповідно з'єднують між собою так, що утворюється



◁ Рис. 84. Будова статора асинхронного двигуна.

Рис. 85. Приєднання затискачів на щитку двигуна при з'єднанні статорних обмоток трикутником (а) та зіркою (б).



трифазна система. На щитку машини 4 знаходяться шість затискачів, до яких приєднуються початки й кінці обмоток кожної фази. Для приєднання статорних обмоток до трифазної мережі їх можна з'єднати зіркою або трикутником, що дає змогу вмикати двигун у мережу з двома різними лінійними напругами. Наприклад, двигун може працювати від мережі з напругою 380 та 220 В. На щитку машини зазначено обидві напруги мережі, на які розрахований двигун, тобто 220/127 В або 380/220 В.

Для нижчих напруг, що зазначені на щитку, статорна обмотка з'єднується трикутником, для вищих — зіркою.

Щоб з'єднати статорні обмотки трикутником, на щитку машини верхні затискачі приєднують перемичками до нижніх (рис. 85, а), а кожну пару з'єднаних затискачів приєднують до лінійних проводів трифазної мережі. Для вмикання зіркою три нижні затискачі на щитку з'єднують перемичками у спільну точку, а верхні приєднують до лінійних проводів трифазної мережі (рис. 85, б).

Осердя ротора 1 (рис. 86, а) також набирають зі сталевих пластин завтовшки 0,5 мм, ізольованих лаком або окалиною для зменшення втрат на вихрові струми. Пластини штампують із западинами і складають у пакети, які закріплюють на валі машини. З пакетів утворюється циліндр із поздовжніми пазами, в які укладають провідники роторної обмотки 2. Залежно від типу обмотки асинхронні машини можуть бути з фазним та короткозамкненим роторами. Короткозамкнену обмотку виконують за типом білячого колеса (рис. 86, б). В пазах ротора укладають масивні стержні, з'єднані на торцевих боках мідними кільцями 3 (див. рис. 86, а). Часто короткозамкнену обмотку ротора виготовляють з алюмінію. Алюміній у гарячому стані заливають у паз ротора під тиском. Така обмотка завжди замкнена накоротко, і ввімкнення в неї опору неможливе. Фазна обмотка ротора виконана аналогічно статорній, тобто провідники відповідно з'єднані між собою, утворюючи трифазну систему. Обмотки трьох фаз з'єднані зіркою. Початки цих обмоток приєднані до трьох контактних мідних

Так само протікає процес зміни частоти обертання ротора і моменту, що розвивається, у разі зменшення навантаження двигуна. Зі зменшенням навантаження на валі двигуна гальмівний момент стає меншим від обертаючого, що призводить до збільшення частоти обертання ротора або до зменшення ковзання. У підсумку зменшуються ЕРС і сила струму в роторній обмотці, а отже, й обертаючий момент, який знову дорівнює гальмівному моменту.

Магнітне поле статора перетинає провідники статорної обмотки й індукуює в ній ЕРС E_1 , яка зрівноважує прикладену напругу мережі U . Якщо знехтувати спадом напруги в опорі статорної обмотки, який дуже малий порівняно з ЕРС, то між абсолютними значеннями прикладеної напруги та ЕРС статорної обмотки можна допустити наближену рівність, тобто $U_1 = E_1$.

Отже, за незмінної напруги в мережі майже незмінною буде й ЕРС статорної обмотки. Магнітний потік у повітряному зазорі машини, як і в трансформаторі, за будь-якої зміни навантаження залишається майже сталим.

Струм роторної обмотки утворює своє магнітне поле, яке спрямоване проти магнітного поля струму статорної обмотки. Щоб результуючий магнітний потік у машині залишався незмінним за будь-якої зміни навантаження двигуна, розмагнічувальне магнітне поле роторної обмотки має бути зрівноважене магнітним полем статорної обмотки. Тому в разі збільшення сили струму в роторній обмотці збільшується і сила струму в статорній.

Отже, асинхронний двигун схожий на трансформатор, у якого зі збільшенням сили струму у вторинній обмотці зростає сила струму і в первинній.

§ 68. ОБЕРТАЮЧИЙ МОМЕНТ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Обертаючий момент асинхронного двигуна утворюється внаслідок взаємодії обертового магнітного поля статора зі струмами у провідниках роторної обмотки. Тому обертаючий момент залежить від магнітного потоку статора Φ_m та від сили струму в роторній обмотці I_2 . Проте у процесі перетворення енергії (утворення обертаючого моменту) бере участь тільки активна потужність, споживана машиною з мережі. Внаслідок цього обертаючий момент залежить не від сили струму в роторній обмотці I_2 , а лише від його активної складової, тобто $I_2 \cos \psi_2$, де ψ_2 — фазний кут між ЕРС та силою струму в роторній обмотці.

Отже, обертаючий момент асинхронного двигуна $M = c \Phi_m I_2 \cos \psi_2$, де c — конструктивна стала машини, що залежить від кількості її полюсів і фаз, кількості витків статорної обмотки та конструктивного виконання роторної обмотки.

За умови сталості прикладеної напруги магнітний потік також залишається сталим для будь-якої зміни навантаження двигуна. Отже, у формулі обертаючого моменту Φ_m і стали, і обертаючий момент прямо пропорційний тільки активній складовій сили струму в роторній обмотці, тобто $M \propto I_2 \cos \psi_2$.

Зміна навантаження або гальмівного моменту на валі двигуна змінює частоту обертання ротора і ковзання, що обумовлює зміну сили струму в роторі I_2 та його активної складової $I_2 \cos \psi_2$. Силу струму в роторній обмотці можна виразити відношенням ЕРС до повного опору, тобто $I_2 = E_2/Z_2 = E_2/\sqrt{R_2^2 + X_2^2}$ та $\cos \psi_2 = R_2/Z_2$, де Z_2 , R_2 та X_2 — повний, активний та реактивний опори фази роторної обмотки.

Разом із ковзанням змінюється частота струму в роторі. Якщо ротор нерухомий ($n_2 = 0$; $S = 1$), обертове поле з однаковою частотою перетинає провідники статорної й роторної обмоток і частота струму в роторі дорівнює частоті струму в мережі ($f_2 = f_1$). Зі зменшенням ковзання обмотка ротора перетинається магнітним полем з меншою частотою і частота струму в роторі зменшується. Коли ротор обертається синхронно з магнітним полем ($n_2 = n_1$; $S = 0$), провідники обмотки ротора не перетинаються магнітним полем і частота струму в роторі дорівнює нулеві ($f_2 = 0$). Отже, частота струму в роторі прямо пропорційна ковзанню: $f_2 = S f_1$.

Активний опір роторної обмотки майже не залежить від частоти, в той час як ЕРС і реактивний опір прямо пропорційні частоті, тобто змінюються зі зміною ковзання: $E_2 = S E$ і $X_2 = S X$, де E та X — відповідно ЕРС та індуктивний опір фази обмотки нерухомого ротора.

Отже, маємо: $I_2 = SE/\sqrt{R_2^2 + (SX)^2}$; $\cos \psi_2 = R_2/\sqrt{R_2^2 + (SX)^2}$; обертаючий момент $M \sim I_2 \cos \psi_2 = SER_2/[R_2^2 + (SX)^2]$.

При невеликому ковзанні (приблизно до 20%), коли SX мале порівняно з R_2 , збільшення ковзання обумовлює зростання обертаючого моменту, оскільки при цьому збільшується активна складова сили струму в роторі ($I_2 \cos \psi_2$). Якщо ковзання велике ($SX > R_2$), то збільшення його обумовлює зниження обертаючого моменту внаслідок значного зростання реактивного опору роторної обмотки.

На рис. 87 показано залежність обертаючого моменту від ковзання. При певному ковзанні S_m (приблизно 20%) двигун розвиває максимальний момент, який визначає перевантажувальну здатність двигуна і в два-три рази перевищує номінальний момент.

Стойка робота двигуна можлива тільки на висхідній ділянці кривої залежності моменту від ковзання, тобто при зміні ковзання від 0 до S_m . Робота двигуна на низхідній ділянці кривої цієї залежності, коли $S > S_m$, неможлива, бо тут не забезпечується стійка рівновага моментів.

Якщо припустити, що обертаючий момент дорівнював гальмівному ($M = M_r$) в точках А і В, то в разі порушення рівноваги моментів

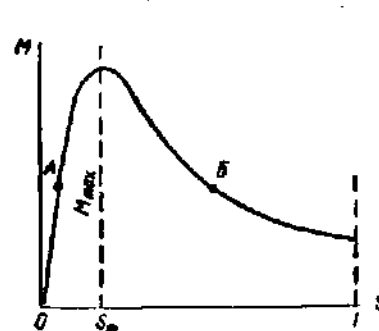


Рис. 87. Залежність обертаючого моменту асинхронного двигуна від ковзання.

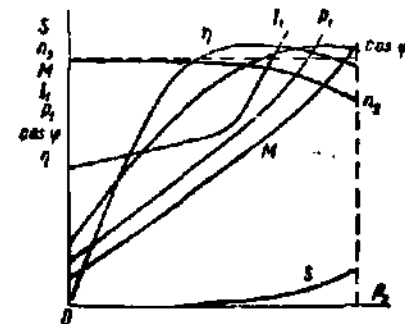


Рис. 88. Робочі характеристики асинхронного двигуна.

у одному випадку вона відновлюється, в іншому — не відновлюється.

Припустимо, що обертаючий момент двигуна чомусь зменшився (наприклад, від зниження напруги в мережі), тоді ковзання почне збільшуватися. Якщо рівновага моментів знаходилася в точці А, то збільшення ковзання обумовить зростання обертаючого моменту двигуна і він знову дорівнюватиме гальмівному моменту, тобто рівновага моментів відновиться. Якщо ж рівновага моментів знаходилася в точці В, то збільшення ковзання обумовить зменшення обертаючого моменту, який залишатиметься завжди меншим від гальмівного моменту, тобто рівновага моментів не відновиться і частота обертання ротора безперервно зменшуватиметься до повної зупинки двигуна.

Якщо до вала двигуна прикласти гальмівний момент, то рівновага моментів не відновиться і ротор двигуна зупиниться.

Обертаючий момент двигуна прямо пропорційний квадратові прикладеної напруги, бо прямо пропорційні напрузі магнітний потік і сила струму в роторі. Тому зміна напруги в мережі обумовлює значну зміну обертаючого моменту.

§ 69. РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Робочі характеристики асинхронного двигуна являють собою залежності ковзання S , частоти обертання ротора n_2 , моменту M , сили споживаного струму I_1 , витраченої потужності P_1 , коефіцієнта потужності $\cos \phi$ та ККД η від корисної потужності P_2 на валі машини. Ці характеристики (рис. 88) знімаються за природних умов роботи двигуна, тобто коли двигун нерегульований, частота струму f_1 і напруга U_1 у мережі залишаються сталими, а змінюється лише навантаження на валі двигуна.

Зі збільшенням навантаження на валі двигуна ковзання зростає, причому в разі великих навантажень ковзання збільшується дещо швидше, ніж при малих навантаженнях. У разі холостого ходу двигуна ковзання дуже мале ($n_2 \approx n_1$ або $S \approx 0$). За номінального навантаження ковзання $S = 3...5\%$. Частота обертання ротора $n_2 = n_1(1 - S) = (60f_1/p)(1 - S)$.

Зі збільшенням навантаження на валі двигуна ковзання зростає, а частота обертання зменшується. Проте зміна частоти обертання зі збільшенням навантаження від 0 до номінального дуже незначна і не перевищує 5%. Тому швидкісна характеристика асинхронного двигуна є жорсткою — у кривій надто малий нахил до горизонтальної осі.

Обертаючий момент M , що розвивається двигуном, зрівноважений гальмівним моментом на валі M_g та моментом M_0 , який іде на подолання механічних втрат: $M = M_g + M_0 = P_2/\Omega_2 + M_0$, де P_2 — корисна потужність двигуна; Ω_2 — кутова швидкість ротора.

У разі холостого ходу двигуна $M = M_0$; зі збільшенням навантаження на валі обертаючий момент також збільшується, причому за рахунок деякого зменшення частоти обертання ротора обертаючий момент збільшується швидше, ніж корисна потужність на валі.

Сила струму I_1 , споживаного двигуном із мережі, нерівномірно змінюється зі збільшенням навантаження на валі двигуна. У разі холостого ходу $\cos \phi$ малий і сила струму має велику реактивну складову. За малих навантажень на валі двигуна активна складова сили струму в статорі менша від реактивної складової, тому активна складова незначною мірою впливає на силу струму I_1 , що обумовлюється в основному реактивною складовою. Якщо навантаження великі, активна складова сили струму в статорі стає більш реактивною і зміна навантаження обумовлює значну зміну сили струму I_1 .

Графічно залежність споживаної двигуном потужності P , зображується майже прямою лінією, яка незначною мірою відхиляється вгору у разі великих навантажень, що можна пояснити збільшенням втрат у статорній і роторній обмотках зі зростанням навантаження.

Коефіцієнт потужності змінюється залежно від навантаження на валі двигуна таким чином. У разі холостого ходу $\cos \phi$ малий (до 0,2), оскільки активна складова сили струму в статорі, обумовлена втратами потужності в машині, мала порівняно з реактивною складовою цієї сили струму, яка утворює магнітний потік. Зі збільшенням навантаження на валі $\cos \phi$ зростає (досягаючи найбільшого значення — 0,8...0,9) внаслідок збільшення активної складової сили струму в статорі. У разі дуже великих навантажень $\cos \phi$ дещо зменшується, оскільки внаслідок значного збільшення ковзання та частоти струму в роторі зростає реактивний опір обмотки ротора.

Крива ККД η має такий самий вигляд, як у будь-якої машини чи трансформатора. У разі холостого ходу ККД дорівнює нулеві. Зі збільшенням навантаження на валі двигуна ККД різко збільшується,

а потім зменшується. Найбільшого значення ККД досягає за навантаження, коли втрати потужності в сталі та механічні втрати, що не залежать від навантаження, дорівнюють втратам потужності в обмотках ротора і статора, які залежать від навантаження.

§ 70. ПУСК АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Під час ввімкнення асинхронного двигуна в мережу змінного струму по обмотках його статора й ротора протікатимуть струми, сила яких у кілька разів більша від номінальної. Це пояснюється тим, що обертове магнітне поле перетинає обмотку нерухомого ротора з високою частотою, яка дорівнює частоті обертання магнітного поля у просторі, й індукуює в цій обмотці велику ЕРС. Ця ЕРС утворює в колі ротора струм великої сили, що обумовлює виникнення струму відповідної сили і в обмотці статора.

Зі збільшенням частоти обертання ротора ковзання зменшується, що призводить до зниження ЕРС і сили струму в роторній обмотці. Це в свою чергу обумовлює зменшення сили струму в обмотці статора.

Велика сила пускового струму небажана як для двигуна, так і для джерела, від якого двигун одержує енергію. Коли пуски здійснюються часто, то велика сила пускового струму призводить до різкого підвищення температури обмоток двигуна, а це може обумовити передчасне старіння його ізоляції. У мережі при великій силі струму знижується напруга, що впливає на роботу інших приймачів енергії, ввімкнених у цю ж мережу. Тому прямий пуск двигуна безпосереднім ввімкненням його в мережу допускається лише в тому разі, коли потужність двигуна набагато менша від потужності джерела енергії, яке живить мережу. Якщо потужність двигуна порівнянна з потужністю джерела енергії, то треба зменшити силу струму, споживаного цим двигуном під час пуску.

У двигунів із фазним ротором дуже хороші пускові характеристики. Щоб знизити, силу пускового струму, обмотку ротора замикають на активний опір, який називається пусковим реостатом (рис. 89). Якщо такий опір ввімкнути в коло роторної обмотки, то сила струму в ній знизиться, а отже, знизяться сила струму в статорній обмотці і сила струму, споживаного двигуном із мережі. При цьому збільшуються активна складова сили роторного струму і обертаючий момент, що розвивається двигуном під час пуску.

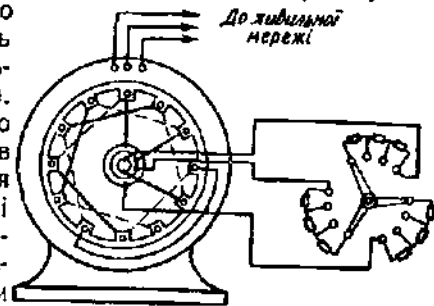


Рис. 89. Схема ввімкнення пускового реостата в коло фазного ротора асинхронного двигуна.

У пускових реостатів є кілька контактів, тому можна поступово зменшувати опір, введений в коло роторної обмотки. Після досягнення ротором нормальної частоти обертання реостат повністю виводиться, тобто роторну обмотку замикають накоротко. За нормальної частоти обертання ротора ковзання мале і ЕРС, що індукується в його обмотці, також незначна. Тому в колі ротора не потрібен жодний додатковий опір.

Пускові реостати працюють нетривалий час у процесі розгону двигуна і розраховуються на короткочасну дію. Якщо реостат буде ввімкненим тривалий час, то він вийде з ладу.

Пуск двигуна з короткозамкненим ротором при малій потужності його порівняно з потужністю джерела енергії здійснюють безпосереднім увімкненням у мережу. У разі великої потужності двигуна силу пускового струму зменшують, знижуючи прикладену напругу. Щоб знизити напругу на час пуску, двигун вмикають у мережу через знижувальний автотрансформатор або реактори. Якщо ротор обертається з нормальною частотою, двигун перемикають на повну напругу мережі.

Недоліком такого способу пуску двигуна є різке зменшення пускового моменту. Для зниження сили пускового струму в n разів треба прикладену напругу також знизити в n разів. При цьому пусковий момент, прямо пропорційний квадратові напруги, зменшиться в n^2 разів.

Отже, зниження напруги допускається під час пуску двигуна без навантаження або з малим навантаженням, коли пусковий момент може бути невеликим.

Часто застосовують пуск двигунів способом перемикання статорної обмотки з зірки на трикутник (рис. 90). В момент пуску статорну обмотку з'єднують зіркою, а після того як двигун розвіє частоту, наближену до нормальної, її перемикають трикутником. За такого способу пуску двигуна сила пускового струму в мережі знижується в три рази порівняно з силою пускового струму, який споживався б двигуном, коли б статорна обмотка під час пуску була з'єднана трикутником. Цей спосіб пуску можна застосовувати для двигуна, статорна обмотка якого, живлячись від мережі з певною напругою, має бути з'єднана трикутником.

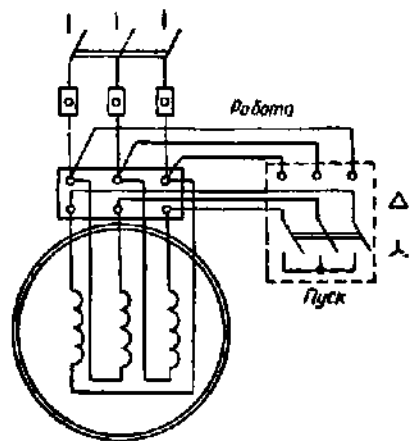


Рис. 90. Схема пуску короткозамкненого асинхронного двигуна перемиканням обмотки статора з зірки на трикутник.

Простота конструкції та надійність в експлуатації двигунів з короткозамкненим ротором є їх суттєвими перевагами, завдяки яким вони набули широкого застосування в промисловості. Проте ці двигуни мають погані пускові характеристики. Значного поліпшення пускових характеристик асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором можна досягти зміною конструкції ротора: використанням ротора з подвійною короткозамкненою обмоткою та з глибокими пазами. Ротор з подвійною короткозамкненою обмоткою вперше був запропонований М. О. Доливо-Добровольським у 1889 р. Він складається з двох короткозамкнених обмоток (рис. 91, а). Кількість пазів

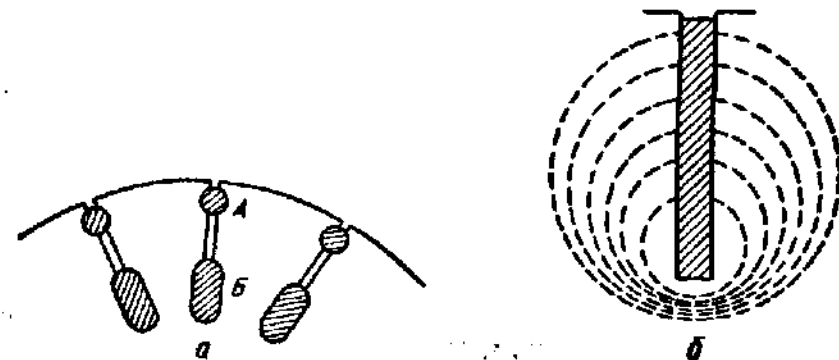


Рис. 91. Схема будови ротора: а — з подвійною короткозамкненою обмоткою; б — з глибокими пазами.

верхньої А та нижньої Б обмоток може бути однаковою або різною. Зовнішня обмотка А виконана із стержнів малого поперечного перерізу, а внутрішня Б — із стержнів великого поперечного перерізу. Тому активний опір обмотки А буде значно більшим від активного опору обмотки Б ($R_A \gg R_B$). Внаслідок того, що стержні внутрішньої обмотки Б глибоко заурені в тіло ротора й оточені сталлю, індуктивний опір внутрішньої обмотки значно більший, ніж зовнішньої ($X_B \gg X_A$).

Принцип дії цього двигуна полягає ось у чому. У момент увімкнення двигуна в мережу ротор нерухомий і частота струму в роторі дорівнює частоті струму в мережі: $f_2 = f_1$. Сила струму в обмотках А і Б розподіляється обернено пропорційно їхнім повним опорам. Оскільки реактивні опори обмоток асинхронних машин значно більші від їхніх активних опорів, то під час пуску двигуна розподіл струму між обмотками А і Б приблизно обернено пропорційний їхнім індуктивним опорам. Тому під час пуску струм протікає в основному

по провідниках зовнішньої обмотки A , у якої менший індуктивний і більший активний опори. Ця обмотка називається пусковою.

У робочому режимі ковзання мале, отже, частота струму в роторі також мала ($f_2 \approx 0$). Тому індуктивні опори обмоток не мають значення і сили струмів у обмотках A і B обернено пропорційні їхнім активним опорам. Отже, у робочому режимі струм в основному протікає по провідниках внутрішньої обмотки B , у якої менший активний опір. Ця обмотка називається р о б о ч о ю. За такої конструкції ротора збільшується активний опір його обмотки в момент пуску двигуна, що зменшує силу пускового струму і збільшує пусковий момент так само, як увімкнення пускового реостата в коло фазного ротора.

У двигунів із глибокими пазами на роторі короткозамкнену обмотку ротора виготовляють у вигляді тонких і високих штаб (рис. 91, б). За такої конструкції обмотки струм відтісняється до верхньої частини провідників внаслідок того, що нижні частини провідників заповнені з більшим магнітним потоком розсіяння, ніж верхні частини.

Це явище відтіснення струму у верхні частини провідників особливо проявляється в момент увімкнення двигуна, коли частота струму в роторі дорівнює частоті струму в мережі, отже, під час пуску двигуна підвищується активний опір роторної обмотки, що збільшує пусковий момент. Зі збільшенням частоти обертання ротора частота струму в його обмотці знижується і струм рівномірніше розподіляється по перерізу стержнів; за нормальної частоти обертання нерівномірність розподілу струму по перерізу стержнів майже повністю зникає.

Пусковий момент двигунів цього типу $M_n = (1...1,5)M_n$, а сила пускового струму $I_n = (4...5)I_n$.

Отже, у двигунів із подвійною короткозамкненою обмоткою та з глибокими пазами пускові моменти більші, а сили пускових струмів менші, ніж у звичайних короткозамкнених двигунів. Проте робочі характеристики цих двигунів дещо гірші, ніж звичайних короткозамкнених: дещо менші $\cos \varphi$, ККД та максимальний момент, оскільки більші потоки розсіяння, тобто вищі індуктивні опори роторних обмоток.

§ 72. РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ТРИФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Частота обертання ротора визначається виразом $n_2 = n_1 (1 - S) = 60f_1 (1 - S)/p$. З цього виразу видно, що частоту обертання ротора можна регулювати зміною будь-якого з трьох параметрів, що обумовлюють її, тобто зміною частоти струму в мережі f_1 , кількості пар полюсів p та ковзання S .

Регулювати частоту обертання асинхронних двигунів зміною частоти струму в мережі складно, бо для цього потрібен регульований перетворювач частоти або генератор. Тому такий спосіб не набув широкого застосування.

Кількість полюсів машини можна змінити, якщо на статорі є кілька (звичайно дві) обмоток з різною кількістю полюсів або одна обмотка, яку можна перемикаєти на різну кількість полюсів, чи дві обмотки, кожну з яких можна перемикаєти на різну кількість полюсів.

На рис. 92, а схематично показано дві котушки однієї фази, з'єднані послідовно. Струм, протікаючи по них, утворює магнітне поле

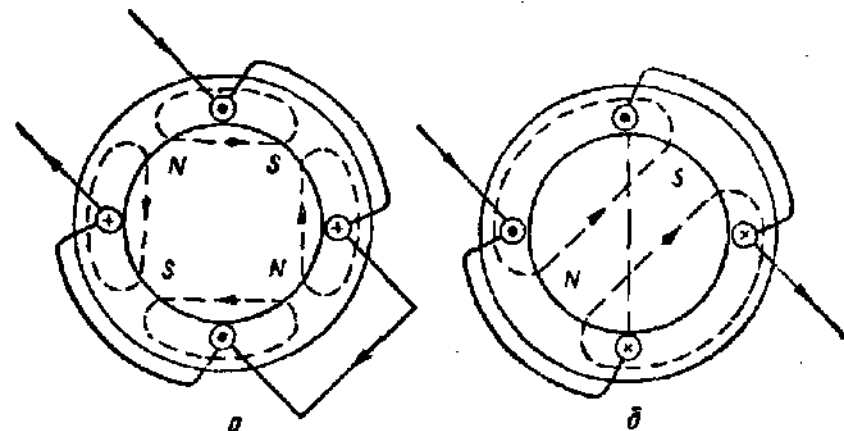


Рис. 92. Схема перемикавання статорної обмотки на різну кількість полюсів: а — чотири полюси; б — два полюси.

з чотирма полюсами. Якщо змінити напрямок струму в одній із котушок, увімкнувши її назустріч другій, то обмотка утворюватиме двополюсне магнітне поле (рис. 92, б). У разі зміни кількості полюсів обмотки статора зміниться й частота обертання його магнітного поля, а також частота обертання ротора. Цей спосіб регулювання частоти обертання асинхронного двигуна економічний, але недоліком його є ступенева зміна частоти. Крім того, вартість такого двигуна значно зростає через ускладнення статорної обмотки та збільшення габаритів машини.

Регулювання частоти обертання зміною кількості полюсів застосовується у двигунів з короткозамкненим ротором; у двигунів із фазним ротором цей спосіб не використовується, оскільки в них одночасно зі зміною кількості полюсів статорної обмотки потрібно такою ж мірою змінювати кількість полюсів роторної обмотки, що дуже складно.

Заводи випускають двигуни з синхронними частотами обертання 500—750—1000—1500 об/хв. На статорі таких двигунів є дві обмотки, кожна з яких допускає перемикання на різну кількість полюсів.

Ковзання можна змінити регулювальним реостатом, введеним у коло роторної обмотки, а також зміною напруги в мережі. Під час регулювання напруги в живильній мережі змінюється обертаючий момент двигуна, який прямо пропорційний квадратові напруги. Зі зменшенням обертаючого моменту зменшується й частота обертання ротора, тобто збільшується ковзання.

Регулювальний реостат вмикається в коло обмотки фазного ротора, як і пусковий реостат, але на відміну від пускового цей реостат розраховується на тривале протікання струму. З увімкненням регулювального реостата сила струму в роторі знизиться, а це обумовить зниження обертаючого моменту двигуна, отже, зменшення частоти обертання або збільшення ковзання. Зі збільшенням ковзання зростають ЕРС і сила струму в роторі. Частота обертання і ковзання змінюватимуться до відновлення рівноваги моментів, тобто доки сила струму в роторі не набуде свого початкового значення. Цей спосіб регулювання частоти обертання може використовуватись тільки у двигунах із фазним ротором і незважаючи на те, що він нееконічний (бо в регулювальному реостаті відбуваються значні втрати енергії), набув широкого застосування.

§ 73. ОДНОФАЗНІ АСИНХРОННІ ДВИГУНИ

Однофазні асинхронні двигуни широко застосовують при невеликих потужностях (до 1...2 кВт). Такий двигун відрізняється від звичайного трифазного тим, що на його статорі розміщується однофазна обмотка. Ротор однофазного асинхронного двигуна має фазну або короткозамкнену обмотку. Особливістю однофазного асинхронного двигуна є відсутність початкового або пускового моменту, тобто з увімкненням такого двигуна в мережу ротор залишатиметься нерухомим.

Якщо ж під дією якоїсь зовнішньої сили вивести ротор зі стану спокою, то двигун розвиватиме обертаючий момент. Відсутність початкового моменту є суттєвим недоліком однофазних асинхронних двигунів. Тому вони завжди укомплектовуються пусковим пристроєм.

Найпростішим пусковим пристроєм є дві обмотки, які розташовані на статорі і зміщені одна відносно одної на половину полюсної поділки (90 ел. град.). Ці обмотки живляться від симетричної двофазної мережі, тобто напруги, прикладені до обмоток, дорівнюють одна одній і зсунуті на чверть періоду за фазою.

При таких напругах струми, що проходять по обмотках, будуть також зсунутими за фазою на чверть періоду, що на додаток до просторового зсуву обмоток дає змогу одержати обертове магнітне поле. За наявності обертового магнітного поля двигун розвиває пусковий момент.

У дійсності двофазна мережа звичайно відсутня, і пуск однофазного двигуна здійснюється увімкненням двох обмоток в одну спільну для них однофазну мережу. Щоб одержати кут зсуву фаз між силами струму в обмотках, який приблизно дорівнює $\pm\pi/2$ (чверть періоду), одну з обмоток (робочу) вмикають у мережу безпосередньо або з пусковим активним опором, а другу обмотку (пускову) — послідовно з котушкою (рис. 93, а) або конденсатором (рис. 93, б).

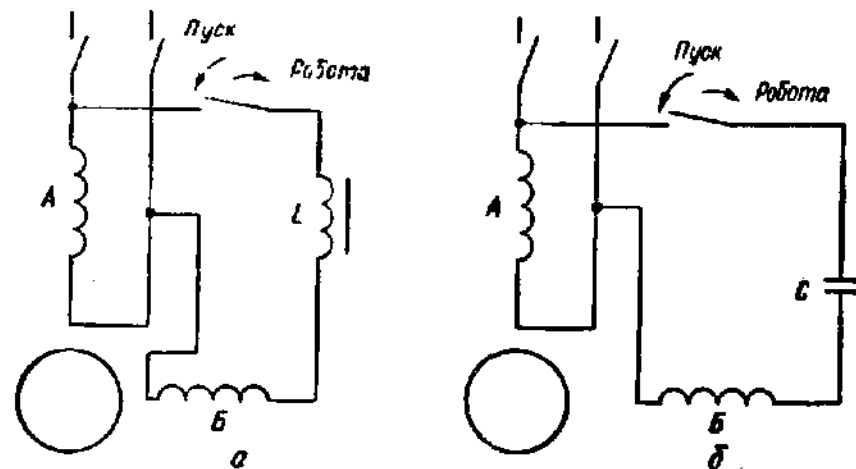


Рис. 93. Схема пуску однофазного двигуна в разі увімкнення в коло пускової обмотки котушки індуктивності (а) та конденсатора (б).

Пускова обмотка вмикається тільки на період пуску двигуна. В момент, коли ротор набуває певної частоти обертання, пускова обмотка вимикається з мережі відцентровим вимикачем або спеціальним реле і двигун працює як однофазний. Як однофазний може бути використаний будь-який трифазний асинхронний двигун. Для роботи трифазного двигуна як однофазного робоча, або головна, обмотка, що складається з двох послідовно з'єднаних фаз, вмикається безпосередньо в однофазну мережу, а третя фаза, яка є пусковою, або допоміжною, обмоткою, вмикається в ту саму мережу через пусковий елемент — резистор, котушку чи конденсатор.

Конденсаторний (двофазний) двигун являє собою однофазний асинхронний двигун з двома обмотками на статорі та короткозамкненим ротором. Допоміжна обмотка розрахована на тривале протікання струму й залишається увімкненою не тільки під час пуску двигуна, але й у процесі роботи. Під час роботи конденсаторного двигуна виникає обертове магнітне поле, яке поліпшує його робочі характеристики порівняно з однофазним. У разі збільшення ємності конденсатора зростає й пусковий момент двигуна. Проте збільшення ємності кон-

денсаторної батареї в робочому режимі небажане, оскільки це приводить до зниження частоти обертання і ККД двигуна. Тому конденсаторні двигуни виготовляють із двома батареями конденсаторів — робочою та пусковою.

§ 74. ПРИНЦИП ДІЇ ТА БУДОВА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

У синхронних машин частота обертання ротора дорівнює частоті обертання магнітного поля статора, отже, залежить від частоти струму в мережі та кількості пар полюсів: $n = 60/p$; $f = pn/60$.

Як і будь-яка електрична машина, синхронна машина оборотна, тобто може працювати і генератором, і двигуном.

Електрична енергія виробляється синхронним генератором, первинним двигуном якого є або гідравлічна, або парова турбіна, або двигун внутрішнього згорання.

Звичайно обмотки збудження стримують енергію від збудника, яким є генератор постійного струму. Збудник знаходиться на одному валі з робочою машиною; його потужність становить приблизно 1...5 % потужності синхронної машини, яка збуджується ним. У разі невеликої потужності часто використовуються схеми живлення обмоток збудження синхронних машин від мережі змінного струму через напівпровідникові випрямлячі.

Найпростішим генератором може бути виток із провідників 1 і 2, який обертається в магнітному полі (див. рис. 30). Магнітне поле збуджується струмом обмотки збудження, розміщеної на полюсах статора $N - S$. Під час обертання витка провідники 1 і 2 перетинають магнітне поле полюсів $N - S$, внаслідок чого у витку індукуються ЕРС. Кінці витка з'єднані з кільцями 3, що обертаються разом з витком. Якщо на кільцях розмістити нерухомі щітки і з'єднати їх з приймачем електричної енергії, то по замкнутому колу, що складається з витка, кільця, щіток та приймача енергії, потече електричний струм під дією ЕРС. Одержана у такому генераторі ЕРС безперервно змінюватиметься залежно від положення витка в магнітному полі. Коли провідники 1 і 2 перебувають під осями полюсів, то під час обертання витка вони перетинають за одиницю часу найбільшу кількість ліній магнітного поля. Отже, в даний момент індукуються у витку ЕРС матиме найбільше значення. У подальшому з повертанням витка зміниться кількість ліній магнітного поля, що перетинаються за одиницю часу провідниками 1 і 2. З повертанням витка на 90° у просторі провідники переміщуватимуться у вертикальному напрямку, який збігається з напрямком магнітних ліній поля. Отже, провідники 1 і 2 не перетинають магнітних ліній, і ЕРС у витку дорівнює нулеві. З повертанням витка на кут, більший за 90° , зміниться напрямок переміщення цих провідників у магнітному полі, а також напрямок ЕРС, що індукуються у витку.

Якщо магнітне поле розподілятиметься між полюсами N і S рівномірно, то ЕРС змінюватиметься в часі синусоїдно. За один оберт витка у просторі ЕРС, що індукуються в ньому, змінюється на один період.

Якщо виток обертається за допомогою будь-якого первинного двигуна зі сталою частотою обертання n за хвилину, то в цьому витку індукуються змінна ЕРС з частотою $f = n/60$.

Виликнення ЕРС у провідниках можливе в разі переміщення цих провідників у нерухомому магнітному полі, а також у разі переміщення магнітного поля відносно нерухомих провідників. У першому випадку полюси, тобто частина машини, що індукують ЕРС і збуджують магнітне поле, розміщуються на нерухомій частині машини (на статорі), а індукуюча частина (якір), тобто провідники, в яких утворюється ЕРС, — на обертовій частині машини (на роторі). У другому випадку полюси розміщуються на роторі, а якір — на статорі.

Вище ми розглянули принцип дії синхронного генератора з нерухомими полюсами та обертовим якорем. У такому генераторі енергія, що виробляється ним, передається приймачеві енергії через ковзні контакти — контактні кільця і щітки. Ковзний контакт у колі великої потужності спричиняє значні втрати енергії, а за високих напруг наявність такого контакту вкрай небажана. Тому генератори з обертовим якорем і нерухомими полюсами виготовляють тільки для невисоких напруг (до 380/220 В) та невеликих потужностей (до 15 кВт · А).

Найширшого застосування набули синхронні генератори, в яких полюси розміщені на роторі, а якір — на статорі. Струм збудження протікає по обмотці збудження, яка являє собою послідовно з'єднані котушки, розміщені на полюсах ротора. Кінці обмотки збудження з'єднані з контактними кільцями, які закріплюються на валі машини. На кільцях розміщуються нерухомі щітки, через які в обмотку збудження підводиться постійний струм від стороннього джерела енергії — генератора постійного струму, який називається з б у д н и к о м.

На рис. 94 подано загальний вигляд синхронного генератора зі збудником. Будова статора синхронного генератора аналогічна будові статора асинхронної машини. Ротор синхронних генераторів виконують або з явно вираженими (виступними) полюсами, або з неявно вираженими полюсами, тобто без виступних полюсів.

У машинах з відносно малою частотою обертання (за великої кількості полюсів) у ротора явно виражені полюси (рис. 95, а), рівномірно розміщені по його обводу. Полюс складається з осердя 1, полюсного накінецьника 2 та обмотки збудження 3.

Первинні двигуни синхронних генераторів з явно вираженими полюсами являють собою гідравлічні турбіни, які є тихохідними машинами. За великої частоти обертання така будова ротора не може забезпечити потрібної механічної міцності і тому високошвидкісні

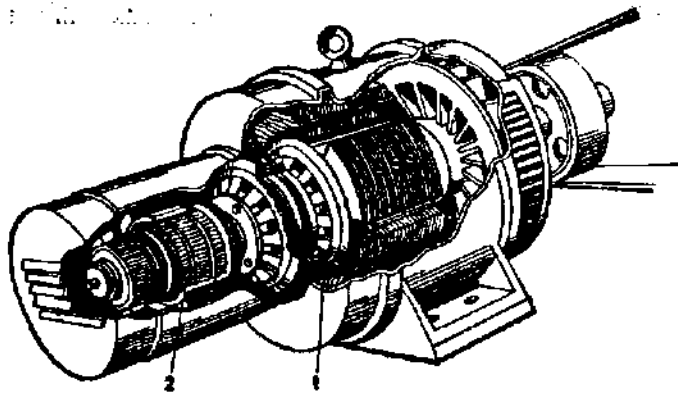


Рис. 94. Будова синхронного генератора:
1 — синхронний генератор; 2 — збудник.

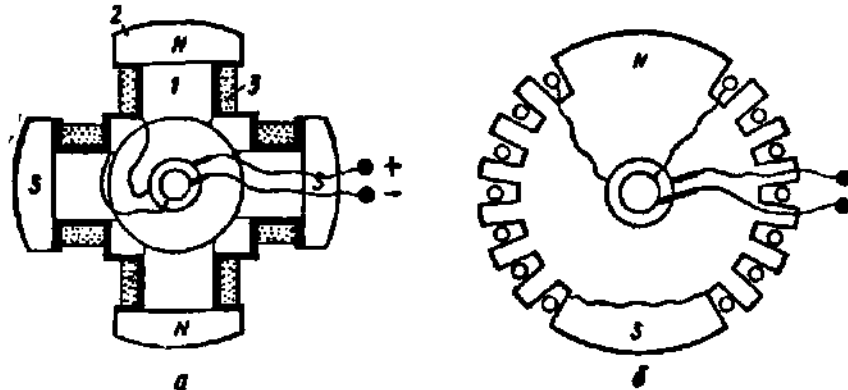


Рис. 95. Ротор синхронної машини:
а — явно вираженими полюсами; б — в неявно вираженими полюсами.

машини обладнані роторами з неявно вираженими полюсами (рис. 95, б). Осердя роторів з неявно вираженими полюсами виготовляють із суцільних поковок, на поверхні яких фрезеруються пази. Після укладання обмоток збудження пази ротора забивають клинами, а лобові з'єднання обмотки збудження закріплюють сталевими бандажми, розміщеними на торцевих частинах ротора. За такої конструкції ротора допускаються високі частоти обертання.

Для генераторів з неявно вираженими полюсами первинними двигунами є парові турбіни, які належать до швидкохідних машин.

Якщо синхронний генератор не навантажений, тобто працює вхолосту, то струму в обмотках статора немає. Магнітний потік полюсів, утворений струмом збудження, індукуює у трифазній обмотці статора ЕРС.

Якщо генератор навантажений, то в обмотці статора протікає струм. У разі симетричного навантаження сили струмів статорної обмотки однакові і зсунуті на третину періоду. Статорні струми утворюють обертове магнітне поле, частота обертання якого $n_1 = \frac{60f}{p} = n$, тобто магнітне поле, утворене струмами у статорній обмотці, обертається синхронно з магнітним полем полюсів. У статорній обмотці синхронного генератора утворюється ЕРС, яка залежить від магнітного потоку полюсів. Якщо магнітний потік полюсів дуже малий, то й ЕРС також мала. Зі збільшенням магнітного потоку зростає й ЕРС машини. Отже, за сталої частоти обертання ротора ЕРС прямо пропорційна магнітному потоку, який збуджується постійним струмом, що протікає по провідниках обмотки збудження. Якщо підвищити силу струму в обмотці збудження, то зростає й магнітний потік полюсів, що обумовить збільшення ЕРС машини. Отже, зі зміною сили струму в обмотці збудження відповідно змінюється й ЕРС машини, а це дає змогу регулювати напругу на затискачах генератора.

У разі холостого ходу синхронного генератора напруга на його затискачах дорівнює ЕРС, що індукуюється у статорній обмотці. Якщо генератор навантажений, то напруга не дорівнює ЕРС, оскільки в опорі (активному й реактивному) статорної обмотки виникає спад напруги. Крім того, струми, протікаючи по статорних обмотках, утворюють потік якірної реакції, який діє на потік полюсів. Отже, при навантаженні магнітний потік не дорівнюватиме магнітному потоку полюсів при роботі генератора вхолосту. Тому зміна навантаження, тобто сили струму у статорі генератора, обумовлюватиме зміну напруги на затискачах генератора, якщо сила струму в обмотці збудження залишиться незмінною.

На рис. 96, а зображено зовнішні характеристики синхронного генератора при активному та реактивному навантаженнях. Ці характеристики показують залежність напруги на затискачах генератора від сили струму навантаження у разі незмінних частоти обертання ротора й сили струму збудження. Різний вигляд цих характеристик для активного, індуктивного та ємнісного навантажень пояснюється неоднаковою дією поля якірної реакції на магнітний потік полюсів.

Для нормальної роботи будь-якого приймача електричної енергії потрібна стала напруга в мережі. Щоб забезпечити сталу напругу в мережі при зміні навантаження у синхронному генераторі, змінюють і силу струму збудження.

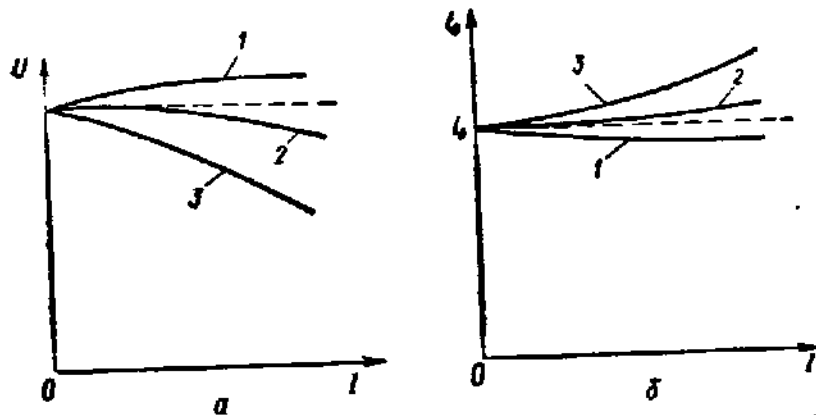


Рис. 96. Зовнішні (а) та регульовані (б) характеристики синхронного генератора:
1 — емнісна; 2 — активна; 3 — індуктивна.

Залежність, що показує, як потрібно змінювати силу струму в обмотці збудження для того, щоб у разі зміни навантаження генератора напруга на його затискачах залишалась незмінною, називається регульовальною характеристикою (рис. 96, б). За активного навантаження збільшення сили струму в статорі обумовлює незначне зниження напруги, оскільки реакція якоря мало зменшує магнітний потік. При цьому навантаженні потрібно незначною мірою збільшити силу струму збудження для забезпечення сталості напруги. За індуктивного навантаження утворюється розмагнічувальне поле якорної реакції, яке зменшує потік полюсів. Тому для сталості напруги, тобто для сталості результуючого магнітного потоку, треба більшою мірою підвищити силу струму збудження, щоб компенсувати розмагнічувальне поле якорної реакції. За емнісного навантаження відбувається підсилення магнітного поля і для сталості напруги треба знизити силу струму збудження зі збільшенням сили струму у статорі.

Найчастіше синхронні генератори працюють на спільну потужну мережу електростанції або енергосистеми. Напруга такої мережі U_n та частота струму в ній незмінні. Напруга на затискачах генератора дорівнює і протилежна за знаком напрузі в мережі: $U_r = -U_n$. Результуюче магнітне поле Φ_r статора, що обертається з частотою $n_1 = 60f/p$ у просторі, випереджає напругу U_r на 90° (рис. 97).

За незмінної напруги в мережі U_n амплітуда магнітного потоку Φ_r результуючого магнітного поля статора також незмінна. За активного навантаження генератора сила струму статора I збігається за фазою з напругою U_r . Потік якорної реакції Φ_a збігається за фазою

в силу струму I , отже, вони зображуються одним вектором, але різного масштабу. Результуючий магнітний потік утворюється дією потоку полюсів Φ_m та потоку якорної реакції Φ_a і може бути поданий геометричною сумою цих магнітних потоків.

Зміна сили струму збудження в генераторі не обумовлює зміни його активної потужності, оскільки потужність, споживана ним від первинного двигуна, залишається незмінною (обертаючий момент первинного двигуна і частота обертання — за значенням незмішні). Тому активна складова сили струму статора стала і кінець вектора I (Φ_a) знаходиться на прямій AB , що паралельна горизонтальній осі. Якщо збільшити силу струму збудження,

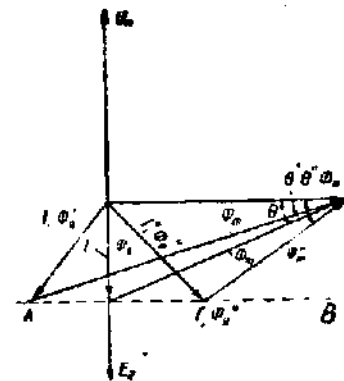


Рис. 97. Векторна діаграма синхронного генератора при різних силах струму збудження.

то зросте магнітний потік полюсів Φ_m , вектор якого знаходиться між прямою AB і кінцем незмінного вектора Φ_r . У цьому випадку зміниться і за значенням, і за напрямком вектор I і Φ_a , тобто сила струму відставатиме за фазою від напруги генератора. Зі зниженням сили струму збудження зменшиться також і потік полюсів Φ_m , що призведе до зміни сили струму в статорі I і Φ_a за значенням і за фазою. Отже, зміна сили струму збудження в генераторі, який працює на потужну мережу, обумовлює зміну реактивної складової сили струму в статорі, тобто змінює реактивну потужність, яку виробляє генератор.

Щоб змінити активну потужність, треба змінити обертаючий момент первинного двигуна, який приводить в обертання ротор синхронного генератора. Під дією обертаючого моменту первинного двигуна M_1 ротор машини з розміщеними на ньому полюсами приводиться в обертання з частотою обертів за хвилину n . Результуюче магнітне поле статора обертається у тому ж напрямку з частотою $n_1 = n$ (рис. 98, а). Отже, поле полюсів Φ_m і результуюче поле статора Φ_r обертаються синхронно, залишаючись нерухомими одне відносно другого, і між цими полями встановлюється взаємодія. Внаслідок цього утворюється електромагнітний гальмівний момент M_2 , який зрівноважує момент первинного двигуна. За рівноваги моментів $M_1 = M_2$ кут між осями магнітних полів θ залишається незмінним.

Якщо збільшити момент первинного двигуна M_1 (рис. 98, б), то він виявиться більшим від гальмівного моменту, і ротор, одержавши певне прискорення, почне переміщатися відносно поля статора, яке обертається зі сталою частотою $n_1 = 60f/p$ (частота струму в

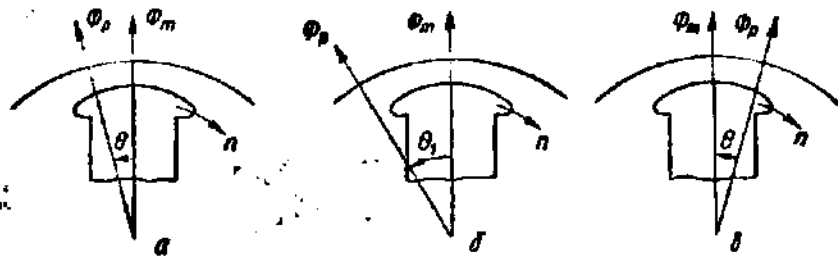


Рис. 98. Кут між осями магнітних полів ротора і статора при меншому (а) та більшому (б) моментах первинного двигуна і в разі роботи синхронної машини двигуном (в).

мережі f стала). При цьому кут між осями магнітних полів ротора і статора θ_1 зростає, збільшуючи гальмівний електромагнітний момент M_e так, що знову відновиться рівновага моментів, тобто $M_1 = M_e$.

Для ввімкнення генератора в мережу потрібно: однакове чергування фаз у мережі і в генераторі; однакові значення напруги в мережі та ЕРС генератора; однакові частоти ЕРС генератора та струму в мережі; вмикання генератора в той момент, коли ЕРС генератора в кожній фазі спрямована назустріч напрузі в мережі. Невиконання цих вимог призводить до того, що в момент ввімкнення генератора в мережу виникають струми, які можуть бути досить високими і вивести генератор з ладу. Для вмикання генераторів у мережу використовують спеціальні пристрої — синхроскопи. Найпростіший синхроскоп являє собою три лампи розжарення, які приєднуються між затискачами генератора і мережі. Лампи розраховують на половинну напругу мережі; до ввімкнення генератора вони повинні одночасно загорятися й гаснути. У той момент, коли ЕРС генератора дорівнює напрузі в мережі і спрямована назустріч їй, лампи погаснуть, оскільки напруга на кожній лампі дорівнюватиме нулеві. Коли лампи погасли, генератор вмикається в мережу. До вмикання генератора в мережу, його ЕРС вимірюють вольтметром і, регулюючи силу струму збудження, встановлюють її однаковою з напругою мережі. Частоту ЕРС генератора регулюють зміною частоти обертання первинного двигуна.

§ 76. СИНХРОННІ ДВИГУНИ

Синхронний двигун не має принципових конструктивних відмінностей від синхронного генератора. Як і в генераторі, на статорі синхронного двигуна розміщено трифазну обмотку, у разі ввімкнення якої в мережу трифазного змінного струму утворюватиметься обертове магнітне поле Φ_r з частотою обертання за хвилину $n_s = 60 f/p$. На роторі двигуна знаходиться обмотка збудження, яка вмикається в мережу джерела постійного струму. Струм збудження утворює маг-

нітний потік полюсів Φ_m . Обертове магнітне поле, утворене струмами статорної обмотки, веде за собою роторні полюси (рис. 98, в). При цьому ротор може обертатися тільки синхронно з полем, тобто з частотою, яка дорівнює частоті обертання статорного поля. Отже, частота обертання синхронного двигуна стала, якщо незмінна частота струму живильної мережі.

Основною перевагою синхронних двигунів є можливість їх роботи зі споживанням випереджаючого струму, тобто двигун може являти собою ємнісне навантаження для мережі. Такий двигун підвищує $\cos \phi$ всього підприємства, компенсуючи реактивну потужність інших приймачів енергії.

Як і в генераторів, у синхронних двигунів зміна реактивної потужності, тобто зміна $\cos \phi$, досягається регулюванням сили струму збудження. За сили струму збудження, яка відповідає нормальному збудженню, $\cos \phi = 1$. Зменшення сили струму збудження обумовлює появу відстаючого (індуктивного) струму в статорі, а збільшення сили струму збудження (перезбуджений двигун) — випереджаючого (емісного) струму в статорі.

Перевагою синхронних двигунів є також менша, ніж у асинхронних, чутливість до зміни напруги живильної мережі. У синхронних двигунів обертаючий момент прямо пропорційний напрузі мережі у першому степені, а в асинхронних — квадратові напруги.

Обертаючий момент синхронного двигуна утворюється внаслідок взаємодії магнітного поля статора з магнітним полем полюсів. Від напруги живильної мережі залежить лише магнітний потік статорного поля.

Синхронні двигуни виготовляють переважно з явно вираженими полюсами і працюють вони в нормальному режимі з випереджачим струмом при $\cos \phi = 0,8$. Збудження вони набувають або від збудника, або від мережі змінного струму через напівпровідникові випрямлячі.

Пуск синхронного двигуна безпосереднім увімкненням його в мережу неможливий, оскільки ввімкнення статорної обмотки в мережу обумовлює утворення обертового магнітного поля, а ротор у момент ввімкнення нерухомий, отже немає взаємодії магнітних полів статора і ротора, тобто двигун не розвиває обертаючого моменту. Тому для пуску двигуна треба попередньо довести частоту обертання ротора до синхронної частоти або такої, що наближається до неї.

Зараз застосовується переважно так званий асинхронний пуск синхронних двигунів, суть якого полягає ось у чому. У полюсних накієнечниках ротора синхронного двигуна укладено пускову обмотку, виконану у вигляді білячого колеса, подібно до короткозамкненої обмотки ротора асинхронної машини. Статорна обмотка двигуна вмикається у трифазну мережу, і пуск його відбувається так само, як і пуск асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Після

того як двигун розві'є частоту, що наближається до синхронної (приблизно 95 %), обмотка збудження вмикається в мережу постійного струму і двигун входить у синхронізм, тобто частота обертання ротора збільшується до синхронної.

Під час пуску двигуна обмотка збудження замикається на опір, який у 10...12 разів більший від опору самої обмотки. Не можна обмотку збудження під час пуску залишати розімкненою або замикати накоротко. Якщо під час пуску обмотка збудження виявиться розімкненою, то в ній індукватиметься дуже велика ЕРС, яка небезпечна як для ізоляції обмотки, так і для обслуговуючого персоналу. Це пояснюється тим, що під час пуску двигуна статорне поле з великою частотою перетинає провідники обмотки збудження.

Якщо обмотку збудження замкнути накоротко під час пуску двигуна під навантаженням, то він може розвинути швидкість, що наближається до половини синхронної, й увійти в синхронізм не зможе.

Робота синхронної машини зі споживанням в мережі випереджаючого струму дає змогу використати її як компенсатор. Компенсатором є синхронний двигун, що працює без навантаження і призначений для підвищення $\cos \phi$ підприємства. Отже, компенсатор є генератором реактивної потужності. Конструктивно компенсатор відрізняється від синхронного двигуна незначною мірою: він не несе механічного навантаження, тому його вал і ротор легші, а повітряний зазор менший, ніж у двигуна.

Основний недолік синхронних двигунів — потреба в джерелах змінного й постійного струму. Потреба в джерелі постійного струму для живлення обмотки збудження синхронного двигуна робить його вкрай неекономічним у разі невеликих потужностей. Тому синхронні двигуни малої потужності зі збудженням постійним струмом не застосовуються. У цих випадках широко використовують реактивні синхронні двигуни. У ротора такого двигуна явно виражені полюси. Для дуже малих потужностей ротор роблять з алюмінію у вигляді циліндра, у який під час виливання закладають стержні з м'якої сталі, які виконують функцію явно виражених полюсів. Циліндрична форма ротора спрощує його обробку й балансування, а також знижує втрати на тертя об повітря в процесі роботи машини, що важливо для двигунів дуже малих потужностей.

У реактивних синхронних двигунів обертаючий момент утворюється внаслідок орієнтування ротора в магнітному полі так, щоб магнітний опір для цього поля був найменшим. Тому ротор завжди займатиме таке положення у просторі, за якого магнітні лінії обертового поля статора замкнуться через сталь ротора і він обератиметься разом з магнітним полем статора.

Контрольні запитання

1. Поясніть принципи дії асинхронного двигуна.
2. Як змінити напрямок обертання ротора асинхронного двигуна?
3. Яка будова асинхронних двигунів із фазним та з короткозамкненим ротором?
4. Від чого залежить обертальний момент асинхронного двигуна?
5. Покажіть графічно робочі характеристики асинхронного двигуна.
6. Як здійснюються пуск та регулювання частоти обертання трифазних асинхронних двигунів?
7. Поясніть принципи роботи та будову синхронного генератора.
8. Яку залежність відображають зовнішні та регульовальні характеристики синхронного генератора?
9. Які умови потрібно виконати, щоб увімкнути синхронний генератор у мережу?
10. Поясніть принцип роботи синхронного двигуна.

Розділ VIII. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

§ 77. ПРИНЦИП ДІЇ ТА БУДОВА ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Найпростішим генератором є виток, що обертається в магнітному полі полюсів N і S (див. рис. 50). У такому витку індукується змінна у часі ЕРС. Тому при з'єднанні кінців витка з контактними кільцями, що обертаються разом з витком, у навантаженні через нерухомі щітки протікає змінний струм, тобто така машина буде генератором змінного струму.

Для перетворення змінного струму в постійний застосовують колектор, принцип дії якого полягає ось у чому. Кінці витка I (рис. 99, а) приєднуються до двох мідних напівкільць (сегментів), що називаються колекторними пластинами 4. Пластини жорстко закріплені на валі машини й ізольовані одна від одної та від вала. На пластинках розміщені нерухомі щітки 2 і 3, електрично з'єднані з приймачем енергії.

Під час обертання витка колекторні пластини також обертаються разом з валом машини і кожна з нерухомих щіток 2 і 3 стикається то з однією, то з іншою пластиною. Щітки на колекторі встановлені так, що вони переходять з однієї пластини на другу в той момент, коли ЕРС, що індукується у витку, дорівнює нулеві. У цьому разі під час обертання якоря у витку індукується змінна ЕРС, яка змінюється синусоїдно за рівномірного розподілу магнітного поля, але кожна щітка стикається з тією колекторною пластиною і відповідно з тим провідником, який у даний момент перебуває під полюсом певної полярності.

Отже, ЕРС на щітках 2 і 3 знаку не змінює, і струм по зовнішній ділянці замкненого електричного кола протікає в одному напрямку —

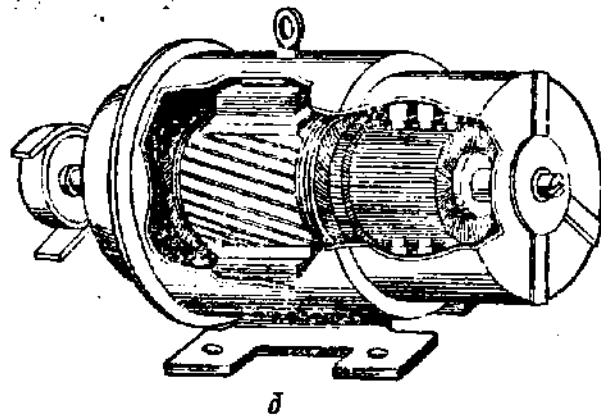
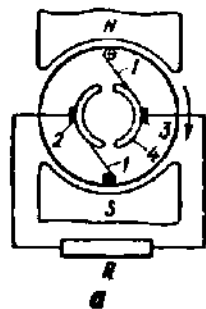


Рис. 99. Генератор постійного струму:
а — схема будови; б — загальний вигляд

від щітки 2 через опір R до щітки 3. Проте, незважаючи на незмінність напрямку ЕРС у зовнішньому колі, її значення міняється з часом, тобто одержано не сталу, а пульсуючу ЕРС. Струм у зовнішньому колі буде також пульсуючим.

Якщо розмістити на якорі два витки під кутом 90° один до одного і кінці цих витків з'єднати з чотирма колекторними пластинами, то пульсація ЕРС і сили струму у зовнішньому колі значно зменшаться. Зі збільшенням кількості колекторних пластин пульсація швидко зменшується і при великій кількості колекторних пластин ЕРС і сила струму практично сталі.

На рис. 99, б показано загальний вигляд машини постійного струму. Її нерухома частина — індукуюча, тобто вона утворює магнітне поле, а обертова частина — індукована (якір).

Нерухома частина машини (рис. 100, а) складається з головних полюсів 1, додаткових полюсів 2 і станини 3. Головний полюс (рис. 100, б) являє собою електромагніт, який утворює магнітний потік. Він складається з осердя 4, обмотки збудження 6 та полюсного накінецьника 7. Полюс закріплюється на станині 3 болтом 5. Осердя полюса з поперечним перерізом овальної форми відливають зі сталі. На осерді полюса розміщується обмотка збудження з ізоляваного мідного проводу. Котушки всіх полюсів з'єднуються послідовно, утворюючи обмотку збудження. Струм, що протікає по обмотці збудження, утворює магнітний потік. Полосний накінецьник утримує обмотку збудження на полюсі і забезпечує рівномірний розподіл магнітного поля під полюсом. Полосному накінецьнику надають такої форми, за якої повітряний зазор між полюсами та якорем однаковий по всій довжині полюсної дуги. У додаткових полюсів також є осердя та обмотки.

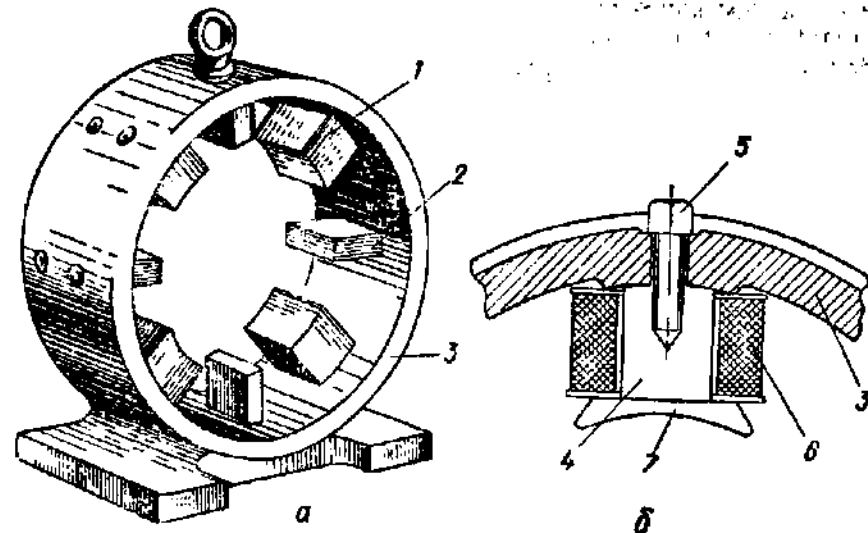


Рис. 100. Будова статора машини постійного струму:
а — схема статора; б — схема головного полюса.

Додаткові полюси розміщені між головними полюсами і кількість їх може або дорівнювати кількості головних полюсів, або бути вдвічі меншою. Додаткові полюси встановлюють у машинах великих потужностей; вони служать для усунення іскріння під щітками. У машинах малих потужностей додаткових полюсів немає.

Станину, яка є остовом машини, виливають зі сталі. На ній закріплюють головні й додаткові полюси, а на торцевих боках її — бічні щити з підшипниками, які утримують вал машини. За допомогою станини машину закріплюють на фундаменті.

Обертова частина машини — якір (рис. 101, а) — складається з осердя 1, обмотки 2 і колектора 3. Осердя являє собою циліндр, складений із листів електротехнічної сталі. Листи ізолюють один від одного лаком або папером для зменшення втрат на вихрові струми. Сталеві листи штампують на верстатах по шаблону; у них є пази, в які укладають провідники якірної обмотки. У тілі якоря передбачають повітряні канали для охолодження обмотки й осердя. Обмотку старанно ізолюють від осердя й закріплюють у пазах немагнітними клинами. Лобові з'єднання закріплюють сталевими бандажами. Усі секції обмотки, розміщені на якорі, з'єднують послідовно, утворюючи замкнене коло, і приєднують до колекторних пластин.

Колектор являє собою циліндр, що складається з окремих пластин. Колекторні пластини виготовляють із твердотягнутої міді й ізолюють між собою та від корпусу прокладками з міканіту. Для

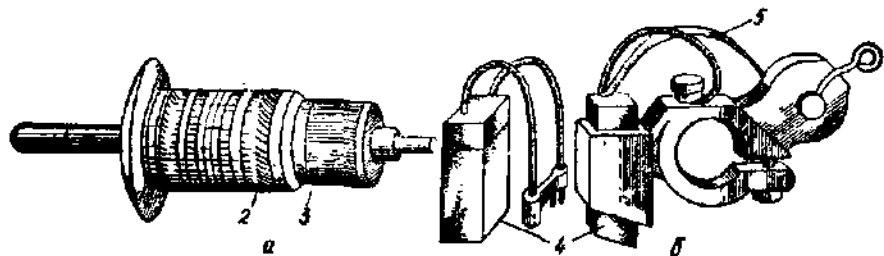


Рис. 101. Якір машини постійного струму:
а — загальний вигляд; б — щітка і щіткотримач.

закріплення на втулці колекторним пластинам надають форми «ластівчиного хвоста», який затискується між виступом на втулці і шайбою, які мають форму, що відповідає формі пластини. Шайбу прикріплюють до втулки болтами.

Колектор — це найскладніша у конструктивному відношенні і найвідповідальніша в роботі частина машини. Поверхня колектора має бути строго циліндричною, щоб уникнути биття та іскріння щіток.

Для з'єднання якірної обмотки з зовнішнім колом на колекторі розміщують нерухомі щітки, які можуть бути графітними, вугільно-графітними або бронзо-графітними. У машинах високої напруги застосовують графітні щітки з великим перехідним опором між щіткою й колектором, у машинах низької напруги — бронзо-графітні щітки. Щітки розміщують у особливих щіткотримачах (рис. 101, б). Щітка 4, розміщена в обіймі щіткотримача, притискується пружиною 5 до колектора. На кожному щіткотримачі може знаходитися кілька щіток, приєднаних паралельно.

Щіткотримачі закріплюють на щіткових болтах-пальцях, які в свою чергу закріплені на траверсі. Для закріплення на щітковому пальці у щіткотримача є отвір. Щіткові пальці ізолюють від траверси ізоляційними шайбами та втулками. Кількість щіткотримачів дорівнює кількості полюсів. Траверсу встановлюють на підшипниковому щиті в машинах малої й середньої потужності або прикріплюють до станини — у машинах великої потужності. Траверсу можна повертати і цим міняти положення щіток відносно полюсів. Траверсу встановлюють у такому положенні, за якого розміщення щіток у просторі збігається з розміщенням осей головних полюсів.

§ 78. ЯКІРНІ ОБМОТКИ ТА ЕРС МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Якірні обмотки машини постійного струму виготовляють з ізованих мідних проводів, а машин великих потужностей — із шин прямокутного поперечного перерізу; обмотки виконують замкненими.

Якщо обмотки виготовляють із шин прямокутного поперечного перерізу, то їх роблять стержньовими, а кожна секція може складатися з двох активних проводів (одновиткова секція). Секції обмоток з ізованого мідного проводу мають вигляд котушок з певною кількістю витків (багатовиткові секції).

У машинах постійного струму найширше застосовуються двошарові обмотки, у якірних пазах яких активні частини секцій розміщуються двома шарами. Кожна секція обмотки складається з двох активних частин, розміщених одна від одної на відстані, що наближається до полюсного поділу (відстань між осями сусідніх різнойменних полюсів). За такої відстані між активними провідниками (крок обмотки) ЕРС, що індукуються в цих провідниках, будуть спрямовані в один бік, і ЕРС секції буде найбільшою, оскільки ЕРС її активних частин додаються (рис. 102). Одна активна частина секції знаходиться

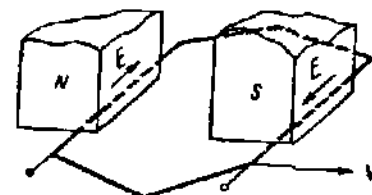


Рис. 102. Спрямування ЕРС в активних частинах обмоткової секції.

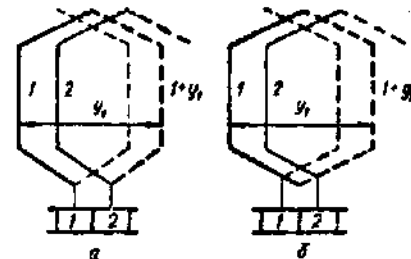


Рис. 103. Секції простої паралельної обмотки:
а — одновиткова; б — багатовиткова.

у верхньому шарі паза, друга — у нижньому. На розгорнутих схемах обмоток активні частини, що знаходяться у верхньому шарі паза, зображуються суцільною лінією, а частини нижнього шару — переривчастою. Кінці секції з'єднуються з іншими секціями обмотки та в колекторними пластинами.

Секції, які утворюють обмотки, з'єднуються між собою так, щоб індуковані в них ЕРС були спрямовані в один бік. Для цього початкові (кінцеві) провідники послідовно з'єднаних секцій мають знаходитися в будь-який момент під полюсами однакової полярності.

Залежно від порядку з'єднання секцій обмотки можуть бути паралельними (петльовими) та послідовними (хвильовими).

На рис. 103 показані (жирнішою лінією) одновиткова (а) та багатовиткова (б) секції паралельної обмотки; секція складається з активної частини верхнього шару паза 1 та нижнього шару паза 1 + 2. У цих обмотках послідовно з'єднуються між собою початкові (кінцеві) секції, активні частини яких знаходяться під одним полюсом у розташованих поруч пазах. Отже, кінці секції паралельної обмотки приєднуються до двох сусідніх колекторних пластин (1 і 2), причо-

му в багатовиткових секціях до пластини 1 приєднується початок першого витка, а до пластини 2 — кінець останнього витка, з'єднаний з початком наступної секції. Будь-яка колекторна пластина (наприклад, 1) з'єднується з двома активними проводами, у кожному з яких протікає струм одного паралельного відгалуження обмотки силою i_a , тому між двома щітками різної полярності обмотка утворює два паралельні відгалуження. За паралельних обмоток кількість щіток завжди має дорівнювати кількості полюсів $2p$, отже, кількість паралельних відгалужень $2a$ в цих обмотках дорівнює кількості полюсів: $2a = 2p$ ($a = p$).

У разі великої кількості полюсів паралельна обмотка утворює багато паралельних відгалужень, а це дає змогу обмежити силу струму в одному відгалуженні і зменшити поперечний переріз обмоткового проводу.

У послідовних обмотках початкові (кінцеві) активні проводи секцій перебувають під різними полюсами однакової полярності (рис. 104). Активні частини першої знаходяться під полюсами N_1 і S_1 . Активні частини другої секції, послідовно з'єднаної з першою, знаходяться під полюсами N_2 і S_2 , третьої секції — під полюсами N_3 і S_3 і т. д. Після приєднання всіх секцій по обводу якоря з'єднують верхній провідник пари $n-1$, що знаходиться поруч (звичайно зліва), з провідником пари n , від якого почали обхід обмотки. Послідовно з верхнім провідником пари $n-1$ приєднують провідники, що знаходяться під полюсами S_1, N_2, S_3 і т. д., по обводу якоря, а потім провідник, що знаходиться поруч з провідником $n-1$. Після цього знову з'єднують пари провідників, що знаходяться під різними полюсами по обводу якоря і т. д., поки всі провідники не будуть приєднані в замкнене коло.

Рис. 104. Розгорнута схема двох секцій простої послідовної обмотки: а — одновиткової; б — багатовиткової.

Незалежно від кількості полюсів проста послідовна обмотка утворює два паралельні відгалуження, тобто $2a = 2$. Тому за будь-якої кількості полюсів у машини може бути лише дві щітки, якщо якірна обмотка послідовна, причому ці щітки мають розміщуватися на відстані $0,5p$ колекторного обводу. Наприклад, при $p = 2$ відстань між щітками повинна дорівнювати четвертій частині колекторного обво-

ду. Це уможливило доступ для огляду не всього обводу колектора, а лише його частини. Наявність тільки двох паралельних відгалужень свідчить про те, що в кожному відгалуженні з'єднується велика кількість активних проводів і ЕРС машини може бути великою. Тому послідовні обмотки застосовуються в машинах високої напруги.

З провіднику, що переміщується в магнітному полі у напрямку, перпендикулярному до напрямку магнітних ліній цього поля, утворюється ЕРС $e = Blv$, де B — середнє значення магнітної індукції, Тл; l — довжина провідника, м; v — швидкість переміщення провідника, м/с.

На якорі машини укладається велика кількість активних провідників, яку позначимо літерою N . У кожному паралельному відгалуженні обмотки буде послідовно приєднано $N/(2a)$ активних провідників. Отже, ЕРС машини $E = eN/(2a) = BlvN/(2a)$.

Швидкість переміщення провідників у магнітному полі $v = 2\pi r n / 60$, де $2p$ — кількість полюсів машини; τ — полюсний поділ; n — частота обертання якоря за хвилину.

Маючи на увазі, що добуток середнього значення магнітної індукції B на осьову довжину полюса l та на полюсний поділ τ являє собою магнітний потік одного полюса $\Phi = Bl\tau$, дістанемо для ЕРС машини такий вираз: $E = n\Phi p N / (60a)$.

Для кожної машини p, N та a — величини сталі, тому відношення $pN/(60a) = c$ стало для даної машини. Отже, ЕРС машини постійного струму визначається виразом $E = cn\Phi$, тобто вона дорівнює добутку стало конструктивного параметра c на частоту обертання якоря n та магнітний потік полюсів Φ . Цей вираз показує, що для зміни ЕРС (або напруги) машини треба змінити або частоту обертання якоря, або магнітний потік полюсів. Оскільки зміна частоти обертання двигуна, який приводить у рух генератор, пов'язана зі значними труднощами, то на практиці ЕРС і напругу регулюють зміною магнітного потоку, який залежить від сили струму в обмотці збудження. В коло обмотки збудження приєднують реостат для зміни сили струму збудження.

§ 79. МАГНІТНЕ ПОЛЕ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗА НАЯВНОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ

У разі холостого ходу машини струму в якорі немає і магнітне поле утворюється магніторухлиною силою полюсів. Воно симетричне відносно осі полюсів і розподіляється рівномірно у повітряному зазорі (рис. 105, а). Припустимо, що щітки встановлені на геометричній нейтралі, тобто на лінії, що проходить через центр якоря і перпендикулярна до осі полюсів.

За наявності навантаження машини в якірній обмотці протікає струм, що утворює своє магнітне поле, яке, діючи на магнітне поле

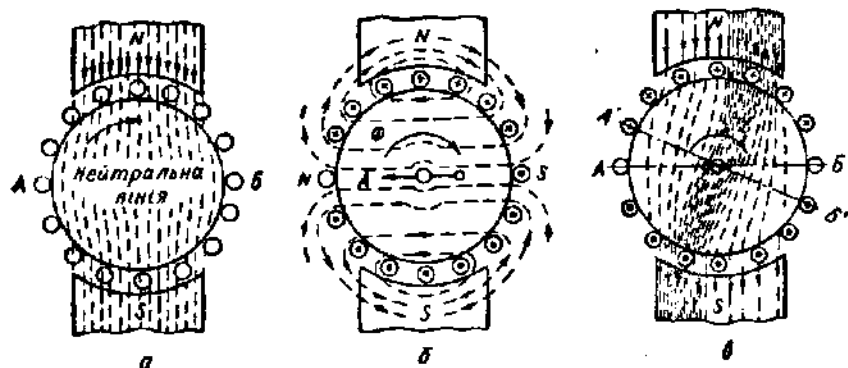


Рис. 105. Магнітне поле машини постійного струму:
 а — магнітне поле полюсів; б — магнітне поле якоря; в — результуюче магнітне поле за наявності навантаження

полюсів, змінює і спотворює його, тобто у магнітному колі замкнеться результуючий магнітний потік Φ_r під дією магніторушійних сил полюсів і якоря. Результуючий магнітний потік Φ_r не дорівнює поточковій індукції Φ_m за холостого ходу. Дія поля, утвореного струмом у якорі в разі навантаження машини, на магнітне поле полюсів називається реакцією якоря.

Якщо через провідники якірної обмотки незбудженої машини пропустити від стороннього джерела струм такої сили, як і в разі навантаження машини, то виникне магнітне поле якоря (рис. 105, б). Це поле замикається у напрямку, перпендикулярному до осі полюсів, і називається поперечним полем якірної реакції.

Магніторушійна сила якоря під одним краєм полюса (під набіжним для генератора і збіжним для двигуна) спрямована назустріч магніторушійній силі полюсів, а під другим краєм (під збіжним для генератора і набіжним для двигуна) — згідно з магніторушійною силою полюсів. Отже, під одним краєм полюса зменшується магнітна індукція, а під другим — збільшується.

Якщо машина перебуває під навантаженням, то результуюче магнітне поле буде несиметричне відносно осі полюсів (рис. 105, в), тобто поперечне поле якірної реакції перерозподіляє магнітне поле полюсів, послаблюючи його під одним краєм і підсилюючи під другим. Поле якірної реакції також зміщує фізичну нейтраль, тобто лінію, що проходить через центр якоря і перпендикулярну до МРС результуючого магнітного поля.

Якщо магнітна система машини не насичена, то збільшення магнітного потоку під одним краєм полюса дорівнюватиме зменшенню магнітного потоку під другим краєм, і результуючий магнітний потік залишиться незмінним зі зміною навантаження.

Оскільки машини працюють за наявності порівняно сильних магнітних полів, то внаслідок насичення сталі збільшення магнітного потоку під одним краєм полюса буде нижчим, ніж зменшення магнітного потоку під другим краєм. Тому результуючий магнітний потік за наявності навантаження буде меншим від магнітного потоку полюсів, тобто від магнітного потоку в разі холостого ходу.

Зміна магнітного потоку машини призводить до зміни ЕРС генератора та напруги на його затискачах. Якщо, наприклад, у генераторі за незмінної сили струму збудження збільшиться навантаження (сила струму в якорі), то внаслідок розмагнічувальної дії поля якірної реакції магнітний потік машини зменшиться, що обумовить зниження ЕРС генератора та напруги на затискачах. Тому у випадках, коли потрібна сталість ЕРС та напруги на затискачах генератора, зі збільшенням навантаження машини збільшують і силу струму збудження, щоб зростання магнітного потоку полюсів компенсувало розмагнічувальну дію якірної реакції. Крім того, за наявності навантаження напруга зменшується внаслідок спаду напруги в опорі якірної обмотки.

§ 80. КОМУТАЦІЯ СТРУМУ

Під комутацією розуміють перемикання секцій з одного паралельного відгалуження на інше та зміна при цьому напрямку струму.

Під час обертання якоря машини колекторні пластини по чергово стикаються зі щітками, тому в певні проміжки часу секція чи кілька секцій замикаються щіткою. Оскільки перехідний опір між щіткою та колекторною пластинкою порівняно невеликий, то замикання секцій відбувається до короткого замикання.

На рис. 106, а показано секцію простої паралельної обмотки. У цій секції протікає струм одного паралельного відгалуження. Сила цього струму $i_a = I/(2a)$, де I — сила струму навантаження; $2a$ — кількість паралельних відгалужень обмотки.

Під час обертання якоря його обмотка і колектор переміщуються відносно нерухокої щітки справа наліво. У певний момент, що відповідає початку комутації, щітка стикається з колекторною пластинкою 1, з'єднаною з двома проводами обмотки, в кожному з яких протікає струм одного паралельного відгалуження. Отже, через колекторну пластину і щітку протікає струм, сила якого дорівнює сумі сил струмів двох паралельних відгалужень $2i_a$. У виділеній нами секції сила струму дорівнює силі струму одного паралельного відгалуження і в даний момент струм спрямований проти годинникової стрілки.

Далі під час обертання якоря щітка стикатиметься з колекторними пластинками 1 і 2, замикаючи виділену нами секцію (рис. 106, б). У певний момент щітка повністю перейде на колекторну пластину 2, і струм у цій секції змінить напрямок на зворотний (рис. 106, в).

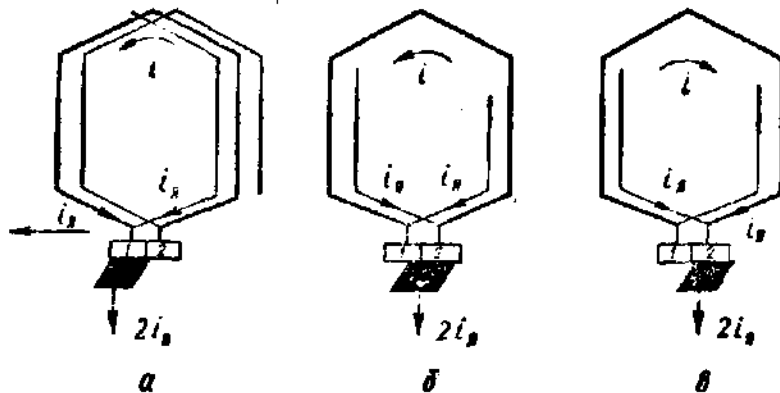


Рис. 106. Комутувана секція обмотки:
а — до початку комутації; б — під час комутації; в — після закінчення комутації.

тобто секція перемикається з одного паралельного відгалуження на інше. Час перемикання секції, що називається періодом комутації, малий, і за цей час сила струму в секції зміниться від $+i_a$ до $-i_a$. Зі зміною сили струму в секції утворюється ЕРС самоіндукції, яка може досягати порівняно великих значень. Крім того, оскільки процес комутації відбувається одночасно в кількох секціях під усіма щітками, то в кожній секції виникають ЕРС взаємодуції. Ці ЕРС самоіндукції та взаємодуції, які називаються реактивними ЕРС e_r , перешкоджають зміні сили струму і обумовлюють нерівномірний розподіл густини струму під щіткою, що є причиною утворення іскріння, яке особливо інтенсивне в момент розмикання щіткою обмоткової секції.

Надмірна густина струму за наявності різниці потенціалів між щіткою та колектором призводить до утворення дугового розряду, який іонізує найтонші шари повітря, що знаходиться між щіткою та колектором, і сприяє розвитку дуги. Дуга може перейти до щітки іншої полярності, утворивши коловий вогонь на колекторі, а це призведе до його пошкодження.

Іскріння щіток може бути обумовлене також низкою інших причин: нерівністю поверхні колектора, биттям щіток, забрудненістю поверхні колектора, наявністю вологи на ній тощо. Навіть незначне іскріння щіток небажане, бо воно збільшує зношення щіток і колектора й підвищує нагрівання колектора внаслідок зростання перехідного опору між щіткою й колектором.

Найефективнішим способом поліпшення комутації є компенсація реактивних ЕРС. Для цього в зоні комутації, в якій знаходяться активні частини комутуваних секцій, треба утворити таке зовнішнє магнітне поле, за якого індуквана в секціях ЕРС обертання e_o до-

рівнюватиме реактивній ЕРС e_r , і буде протилежною їй, тобто $e_o = -e_r$. Для створення такого зовнішнього магнітного поля встановлюють додаткові полюси N_k і S_k , розміщуючи їх між головними полюсами.

Якщо якір генератора (рис. 107) обертається від якогось двигуна в напрямку годинникової стрілки, то в якірній обмотці індукується ЕРС і в разі навантаження протікає струм. Напрямки ЕРС і струму в провідниках збігаються. На схемі виділено провідники 1 і 2 комутованої секції. Реактивна ЕРС e_r , перешкоджаючи зміні струму в комутованій секції, буде спрямована у провідниках 1 і 2 назустріч зміні струму. Для компенсації реактивної ЕРС у провідниках 1 і 2 треба утворити ЕРС обертання $e_o = -e_r$, для чого і встановлені додаткові полюси N_k і S_k .

Отже, полярність додаткового полюса в генераторі має бути відповідною полярності наступного за ним у напрямку обертання якоря головного полюса. У двигуні полярність додаткового полюса має відповідати полярності попереднього за напрямком обертання якоря головного полюса.

Обмотку збудження додаткових полюсів з'єднують послідовно з обмоткою якоря для того, щоб реактивна ЕРС була компенсована за будь-якого навантаження машини. Для цього ж магнітне коло додаткових полюсів не насичене, тобто між осердям якоря й додатковим полюсом створено порівняно великий повітряний простір. Оскільки реактивна ЕРС прямо пропорційна силі струму в якорі, то вона компенсується за будь-якого навантаження машини в тому випадку, якщо ЕРС обертання також прямо пропорційна силі струму навантаження. Тому магнітне поле в зоні комутації має змінюватися прямо пропорційно силі струму в якорі.

§ 81. РОБОТА МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В РЕЖИМІ ГЕНЕРАТОРА

Якір генератора приводиться в обертання будь-яким двигуном, що розвиває обертаючий момент M_1 . Під час переміщення провідників якірної обмотки в магнітному полі в них індукується ЕРС, напрямком якої визначається правилом правої руки (рис. 108). Якщо якір

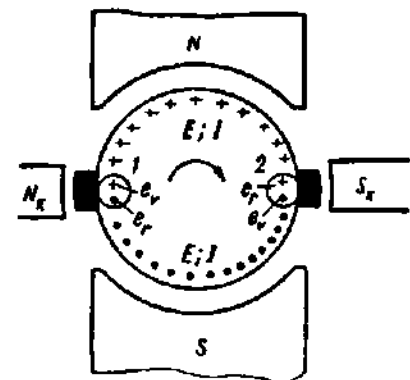


Рис. 107. Полярність додаткових полюсів у генераторах постійного струму.

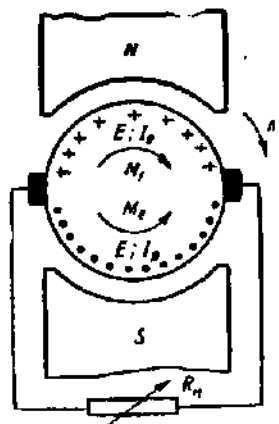


Рис. 108. Схема роботи генератора постійного струму.

обертається з частотою n , то в його обмотці індукується ЕРС $E = n\Phi$.

Коли якірну обмотку замкнуту через щітки на приймач енергії R_n (опір навантаження), то через цей приймач і якірну обмотку протікатиме струм силою I , напрямком якого в якірній обмотці збігається з напрямком ЕРС. Внаслідок взаємодії цього струму з магнітним полем виникає електромагнітний момент M_e , напрямком якого визначається правилом лівої руки.

Електромагнітний момент, що розвивається машиною, є гальмівним, спрямованим назустріч обертанню якоря машини, тому для обертання якоря первинний двигун має розвинути обертаючий момент M_1 , достатній для подолання електромагнітного гальмівного моменту, отже, машина споживає механічну енергію.

У разі рівноваги моментів, тобто коли $M_1 = M_e$, якір машини обертається з незмінною частотою. Порушення рівноваги моментів обумовлює зміну частоти обертання якоря. Якщо з якоїсь причини момент первинного двигуна зменшиться, тобто стане меншим від електромагнітного моменту генератора ($M_1 < M_e$), частота обертання якоря машини почне зменшуватися. При цьому зменшуватиметься ЕРС і сила струму в якірній обмотці, що знизить гальмівний електромагнітний момент генератора. Зі збільшенням моменту первинного двигуна ($M_1 > M_e$) частота обертання якоря, а також ЕРС і сила струму в його обмотці зростатимуть, що збільшить гальмівний електромагнітний момент.

У разі порушення рівноваги моментів частота обертання якоря, ЕРС і сила струму в його обмотці зазнають зміни до відновлення рівноваги моментів, тобто до тих пір, поки електромагнітний момент генератора не дорівнюватиме обертаючому моменту первинного двигуна.

Отже, будь-яка зміна моменту первинного двигуна, тобто споживаної генератором потужності, обумовлює відповідну зміну електромагнітного моменту генератора і вироблюваної ним потужності. Так само зі зміною навантаження генератора потрібна відповідна зміна моменту первинного двигуна для підтримання сталості частоти обертання якоря генератора.

Струм якірної обмотки I в разі навантаження генератора зустрічає на своєму шляху опір зовнішнього навантаження R_n , опір якірної обмотки $R_{об}$ та опір перехідних контактів між щітками і колектором $R_{щ}$. Позначивши через R_m внутрішній опір машини, який являє

собою суму опорів якірної обмотки та щіткових контактів ($R_{об} + R_{щ}$), для сили струму в якорі запишемо такий вираз: $I = E / (R_m + R_n)$.

Опір $R_{щ}$ несталий і залежить від великої кількості факторів: сили і напрямку струму, стану колектора, сили натиску щіток на колектор, частоти обертання.

Спад напруги в щіткових контактах залишається приблизно незмінним за зміни навантаження (береться 2 В на пару вугільних та графітних щіток). Тому внутрішній опір машини також не сталий зі зміною навантаження генератора.

Оскільки $IR_m = U$, де U — напруга на затискачах генератора з навантаженням, то рівняння рівноваги ЕРС для генератора має вигляд $U = E - IR_m$. З цього рівняння легко одержати рівняння потужностей, тобто $UI = EI - I^2R_m$ або $P_2 = P_e - P_m$, де P_2 — корисна потужність генератора, що віддається споживачу електричної енергії; P_e — внутрішня, або електромагнітна потужність генератора, перетворена ним в електричну; $I^2R_m = P_m$ — втрати потужності в якірній обмотці та щіткових контактах.

За холостого ходу генератора електромагнітна потужність дорівнює нулеві ($P_e = 0$), але для обертання якоря машини первинний двигун має затратити деяку потужність $P_{об}$, що витрачається на покриття втрат холостого ходу. Потужність P_0 складається з механічних втрат на тертя в підшипниках і тертя об повітря обертових частин машини $P_{мех}$ та з втрат у сталі на гістерезис і вихрові струми $P_{ст}$. У генераторах із самозбудженням у потужність P_0 входить також потужність, витрачена на утворення магнітного потоку, тобто на збудження машини. У разі навантаження генератора первинний двигун витрачає потужність $P_1 = P_e + P_0$.

Електромагнітний момент машини $M_e = P_e / \Omega$, де $\Omega = 2\pi n / 60$ — кутова швидкість якоря, рад/с; оскільки $P_e = EI$ та $E = \frac{pN}{60a} \cdot n\Phi$, то електромагнітний момент машини визначиться виразом $M_e = \frac{pN}{2\pi a} \cdot I\Phi$.

Параметри p , N і a сталі для даної машини, тому вираз $pN / (2\pi a)$ являє собою сталий для цієї машини коефіцієнт; електромагнітний момент $M_e = KI\Phi$, тобто він прямо пропорційний добуткові сили струму в якорі на магнітний потік полюсів.

Генератори постійного струму можуть бути викопані з магнітним та електромагнітним збудженням. Для утворення магнітного потоку в генераторах першого типу використовують постійні магніти, а в генераторах другого типу — електромагніти.

Постійні магніти застосовують лише в машинах дуже малих потужностей. Отже, електромагнітне збудження є найширше використовуваним способом утворення магнітного потоку. За цього спосо-

бу збудження магнітний потік утворюється струмом, що протікає в обмотці збудження.

Залежно від способу живлення обмотки збудження генератори постійного струму можуть бути з незалежним збудженням та з самозбудженням. За незалежного збудження (рис. 109, а) обмотку збу-

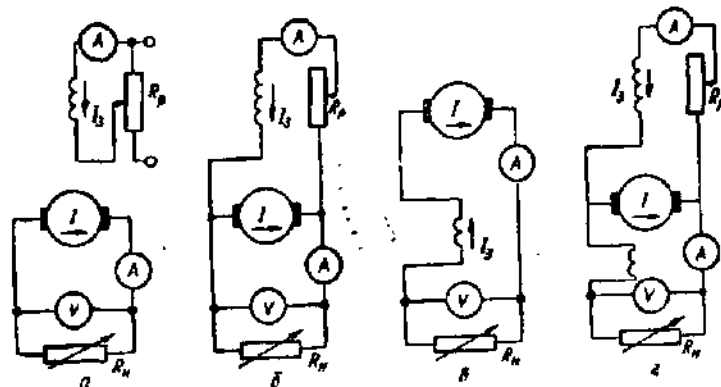


Рис. 109. Схеми збудження генераторів постійного струму: а — незалежного збудження; б — паралельного збудження; в — послідовного збудження; г — змішаного збудження.

дження приєднують в мережу допоміжного джерела енергії постійного струму.

Для регулювання сили струму збудження I_f в коло обмотки введено опір R_p . За такого збудження сила струму I_f не залежить від сили струму в якорі I .

Недоліком генераторів незалежного збудження є потреба в додатковому джерелі енергії. Тому генератори незалежного збудження мають дуже обмежене застосування лише в машинах високих напруг, у яких живлення обмотки збудження від кола якоря неприпустиме з конструктивних міркувань.

Генератори з самозбудженням залежно від способу приєднання обмотки збудження можуть бути паралельного (рис. 109, б), послідовного (рис. 109, в) та змішаного (рис. 109, г) збудження.

У генераторів паралельного збудження сила струму збудження низька (кілька процентів номінальної сили струму в якорі) і обмотка збудження має велику кількість витків. За послідовного збудження сила струму збудження дорівнює силі струму в якорі і обмотка збудження має малу кількість витків. У разі змішаного збудження на полюсах генератора розміщують дві обмотки збудження — паралельну і послідовну.

Процес самозбудження генераторів постійного струму протікає

однаково за будь-якої схеми збудження. Наприклад, у генераторах паралельного збудження, які набули найширшого застосування, процес самозбудження протікає таким чином. Первинний двигун обертає якір генератора, магнітне коло (ядро й осердя полюсів) якого має невеликий залишковий магнітний потік Φ . Цей магнітний потік в обмотці якоря, що обертається, індукуює ЕРС E_a , яка становить кілька процентів номінальної напруги машини. Під дією ЕРС E_a в замкненому колі, що складається з якоря й обмотки збудження, протікає струм силою I_f . Магнітувальна сила обмотки збудження ωI_f (ω — кількість витків) спрямована узгоджено з потоком залишкового магнетизму, збільшуючи магнітний потік машини Φ , що обумовлює зростання ЕРС в обмотці якоря E та сили струму в обмотці збудження I_f . Збільшення сили струму в обмотці збудження призводить до подальшого зростання Φ , що в свою чергу збільшує E та I_f .

Через насичення сталі магнітного кола машини самозбудження відбувається не безмежно, а до якоїсь певної напруги, залежної від частоти обертання якоря машини та від опору в колі обмотки збудження. У разі насичення сталі магнітного кола збільшення магнітного потоку сповільнюється і процес самозбудження закінчується. Збільшення опору в колі обмотки збудження зменшує силу струму в ній та магнітний потік, збуджуваний цим струмом. Тому знижуються ЕРС і напруга, до якої збуджується генератор.

Зміна частоти обертання якоря генератора обумовлює зміну ЕРС, яка прямо пропорційна частоті, внаслідок чого змінюється й напруга, до якої збуджується генератор.

Самозбудження генератора відбуватиметься лише за умов, наведених нижче.

1. У генераторі має бути потік залишкового магнетизму. У разі відсутності цього потоку не утворюватиметься ЕРС E_a , під дією якої в обмотці збудження починає протікати струм, тому збудження генератора буде неможливе. Якщо машина розмагнічена і не має залишкового намагнічування, то через обмотку збудження треба пропустити постійний струм від стороннього джерела електричної енергії. Після від'єднання обмотки збудження в машині знову буде залишковий магнітний потік.

2. Обмотка збудження має бути приєднана узгоджено з потоком залишкового магнетизму, тобто так, щоб намагнічувальна сила цієї обмотки збільшувала потік залишкового магнетизму. У разі зустрічного приєднання обмотки збудження її магнітувальна сила зменшуватиме залишковий магнітний потік і за тривалої роботи може повністю розмагнітити машину. Якщо обмотка збудження приєднана зустрічно, то потрібно змінити напрямок струму в ній, тобто поміняти місцями провідники, що підходять до затискачів цієї обмотки.

3. Опір кола обмотки збудження має бути не дуже великим; у разі дуже великого опору самозбудження генератора неможливе.

4. Опір зовнішнього навантаження має бути великим, оскільки за низького опору сила струму збудження буде також малою і самозбудження не відбудеться.

§ 81. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Характеристики генератора визначають його робочі властивості і являють собою залежності між основними параметрами, якими є ЕРС в обмотці якоря E , напруга на його затискачах U , сила струму в якорі I , сила струму збудження I_s та частота обертання якоря n .

Характеристики являють собою залежності між двома з названих основних параметрів за умови незмінності решти параметрів. Ці залежності не однакові для генераторів різних типів.

Характеристики машини змінюваності міняються всі характеристики якоря, оскільки в разі її змінюваності міняються всі характеристики генераторів.

Характеристика холостого ходу генератора являє собою залежність між ЕРС у якорі та силою струму збудження, одержану без наявності навантаження і за сталої частоти обертання.

Для генераторів незалежного збудження без навантаження (холостий хід) сила струму в якорі дорівнює нулеві. Оскільки ЕРС, індукована в якірній обмотці, $E = c\Phi$, то за сталої частоти обертання ЕРС буде прямо пропорційна магнітному потокові. Тому в змінному масштабі характеристика холостого ходу являє собою магнітну характеристику машини.

Якщо $I_s = 0$, то у магнітного кола машини (головним чином у ярма) є деякий залишковий магнітний потік $\Phi_{\text{зали}}$, який індукуює в якірній обмотці ЕРС $E_{\text{зали}}$ (рис. 110, а). Ця ЕРС становить кілька процентів (2...5 %) номінальної напруги машини. Зі збільшенням сили струму збудження зростають магнітний потік та ЕРС, індукована в якірній обмотці. Отже, з постійним поступовим збільшенням I_s зростає й ЕРС (крива 1). Якщо після зняття висхідного відгалуження залежності від точки А поступово знижувати силу струму збудження I_s , то ЕРС зменшуватиметься, але за рахунок намагнічування сталі низхідне відгалуження (крива 2) піде лещо вище висхідного відгалуження цієї характеристики. Змінюючи I_s не тільки за значенням, а й за напрямком, можна зняти весь цикл перемагнічування сталі. Практично у висхідного й низхідного відгалуження магнітної характеристики зовсім незначне розходження, і за основну характеристику приймається середня залежність (крива 3).

На рис. 110, б показано характеристики холостого ходу, зняті для різної частоти обертання якоря. Обертання якоря машини з номінальною частотою n_n , зазначеною в паспорті генератора, відповідає крива 1. Для всіх машин нормального типу точка номінальної напруги (точка А) знаходиться на перегібні магнітної характеристики, що

відповідає найбільш вдалим робочим і регулювальним властивостям генератора. Вибір точки номінальної напруги на лінійній ділянці магнітної характеристики призводить до різних коливань напруги на затискачах генератора з навантаженням, оскільки незначні коливання магніторушійної сили обумовлюють різну зміну ЕРС. Вибір цієї точки на пологій ділянці магнітної характеристики обмежує регулювання напруги на затискачах генератора, бо для зміни ЕРС потрібні дуже великі зміни сили струму збудження.

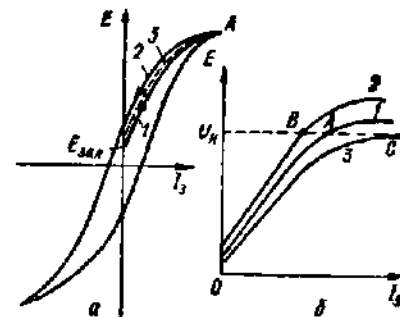


Рис. 110. Характеристика холостого ходу генератора незалежного збудження:

а — у разі перемагнічування сталі; б — у разі зміни частоти обертання якоря.

За частоти обертання генераторного якоря, яка відрізняється від номінальної, змінюється характеристика холостого ходу, оскільки ЕРС прямо пропорційна частоті обертання. Якщо $n' > n_n$, характеристика холостого ходу розташовується вище (крива 2), а якщо $n'' < n_n$ — нижче (крива 3), ніж за номінальної частоти обертання.

Отже, в разі зміни частоти обертання якоря точка номінальної напруги знаходитиметься або на лінійній (точка В), або на пологій (точка С) ділянці магнітної характеристики, що обумовлює зміну всіх характеристик генератора. Тому первинного двигуна для обертання генераторного якоря треба взяти такого, щоб його частота обертання наближалася до номінальної частоти обертання генератора.

Для генераторів паралельного збудження за холостого ходу сила струму в якорі дорівнює силі струму збудження ($I = I_s$). Оскільки ця сила струму мала (кілька процентів номінальної сили струму генератора), то напруга на затискачах машини за холостого ходу приблизно дорівнює ЕРС і характеристика холостого ходу цього генератора практично збігається з характеристикою генератора незалежного збудження. Проте весь цикл перемагнічування в генераторах паралельного збудження зняти не можна, оскільки зі зміною напрямку струму в обмотці збудження магнітний потік її буде спрямовуватись назустріч потокові залишкового магнетизму і самозбудження генератора виявиться неможливим.

Для генераторів послідовного збудження характеристика холостого ходу значення не має, оскільки за холостого ходу в якорі й обмотці збудження сила струму дорівнює нулеві, і характеристику можна зняти лише за схемою незалежного збудження. Для цього обмотка збудження генератора має бути приєднана в мережу незалежного джерела струму.

Для генераторів змішаного збудження характеристика холостого ходу збігається з характеристикою генератора паралельного збудження.

Зовнішня характеристика являє собою залежність напруги на затискачах генератора від сили струму навантаження. Ця характеристика відповідає природним умовам роботи машини, тобто машина не регульована (опір кола збудження R_z сталий) і знімається за незмінної частоти обертання.

Для генераторів незалежного збудження зі сталим R_z , незмінна також і сила струму збудження I_z . Зовнішні характеристики такого генератора показано на рис. 111, а. Крива 1 являє собою зовнішню характеристику на зниження напруги, що відповідає силі струму збудження, за якої напруга генератора дорівнює номінальній для холостого ходу генератора. Зі зростанням навантаження (сили струму в якорі генератора I) збільшується спад напруги в опорі його обмотки та розмагнічувальна дія реакції якоря, що обумовлює зниження напруги. Зі зміною навантаження від нуля до номінального напруга на затискачах генератора зменшується на $\Delta U_{\text{нп}}$.

Характеристиці на підвищення напруги (крива 2) відповідає така сила струму збудження, щоб за номінального навантаження генератора напруга на його затискачах дорівнювала номінальній, після чого навантаження генератора зменшується. Зі зменшенням навантаження (сили струму в якорі) зменшується спад напруги в опорі якірної обмотки та шіткових контактах, а також розмагнічувальна дія якірної реакції, що обумовлює підвищення напруги. Зі зміною навантаження від номінального до нуля напруга на затискачах генератора збільшується на $\Delta U_{\text{па}}$. Внаслідок насичення сталі підвищення напруги буде меншим, ніж зниження, через те що розмагнічувальна дія якірної реакції позначатиметься тим дужче, чим меншою буде міра насичення сталі.

У генераторах паралельного збудження за сталого опору кола збудження R_z сила струму збудження не залишається сталою, оскільки залежить від напруги на затискачах генератора, яка зі зміною навантаження змінюється. У генераторах незалежного збудження збільшення навантаження обумовлює зниження напруги і від дією спаду напруги в опорі машини та реакції якоря (крива 1 на рис. 111, б).

У генераторах паралельного збудження зі зменшенням напруги зменшується сила струму збудження та магнітний потік, що обумовлює зниження напруги. Отже, зі збільшенням навантаження напруга на затискачах генератора цього типу знижується більшою мірою (крива 2), ніж у генераторах незалежного збудження.

Зменшення зовнішнього опору навантаження обумовлює зростання сили струму до значення I_{max} , яке не перевищує номінальну силу струму більш як у 2...2,5 рази. З подальшим зменшенням зовнішньо-

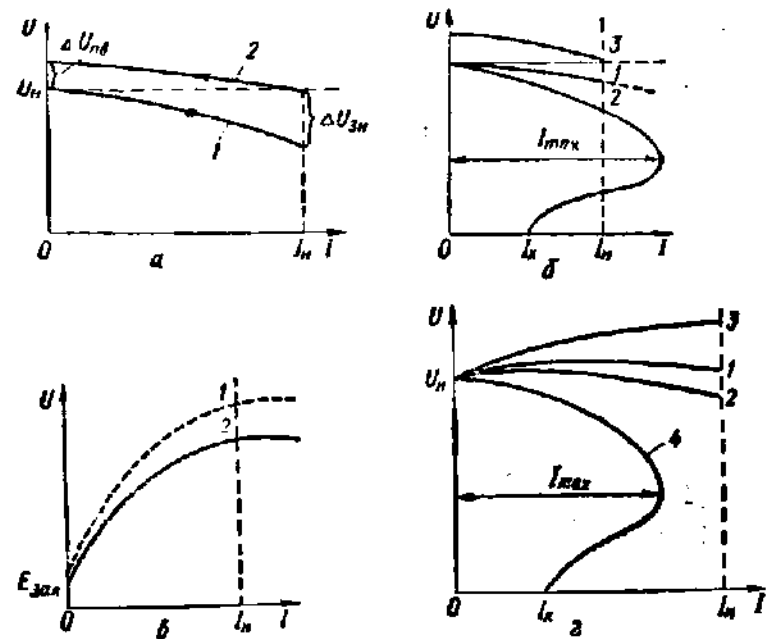


Рис. 111. Зовнішні характеристики генераторів незалежного (а), паралельного (б), послідовного (в) та змішаного (г) збудження.

го опору сила струму знижується і в разі короткого замикання буде значно нижчою від номінальної. Зменшення опору навантаження обумовлює зниження сили струму збудження, оскільки напруга генератора знижується. Якщо сила струму збудження знизилася так, що машина стала розмагніченою, то ЕРС зменшується більшою мірою, ніж опір навантаження, що обумовлює зниження сили струму в якорі. За короткого замикання генератора паралельного збудження сила струму I_z дорівнює нулеві і обмотка збудження не створює магнітного потоку. Тому в якірній обмотці буде ЕРС лише від залишкового магнітного потоку $E_{\text{зал}}$ з малим значенням, а отже, сила струму короткого замикання I_k буде також низькою.

Незважаючи на мале значення усталеної сили струму короткого замикання, не можна сказати, що для генераторів цього типу режим короткого замикання не являє небезпеки. У разі раптового короткого замикання такого генератора сила струму в обмотці збудження знизиться одразу до нуля не може, так само як і магнітний потік. Тому в обмотці якоря в момент короткого замикання буде індукована велика ЕРС, а сила струму буде в багато разів більшою від номінальної, внаслідок чого утвориться інтенсивне іскріння під шітками, яке переходить в коловий вогонь, і машина може вийти з ладу.

Зовнішня характеристика на підвищення напруги в генератора паралельного збудження (крива 3) має такий же вигляд, як і в генератора незалежного збудження.

У генераторі послідовного збудження (рис. 111, в) сила струму збудження дорівнює силі струму якоря ($I_z = I$), і за холостого ходу ($I = 0$) в якірній обмотці буде створена ЕРС за рахунок залишкового магнетизму $E_{зал}$. Зі збільшенням навантаження зростає також сила струму в обмотці збудження, що обумовить збільшення ЕРС (крива 1). Напруга на затискачах генератора з навантаженням менша від ЕРС внаслідок спаду напруги в опорі машини та реакції якоря (крива 2). Отже, у генераторів послідовного збудження напруга різко мінється зі зміною навантаження, тому такі генератори не знайшли застосування.

У генераторах змішаного збудження (рис. 111, а) можливе узгоджене й зустрічне приєднання послідовної й паралельної обмоток. У разі узгодженого приєднання обмоток збудження результуюча магніторушійна сила, яка створює магнітний потік, дорівнює сумі магніторушійних сил паралельної й послідовної обмоток, а в разі зустрічного приєднання — різниці цих намагнічувальних сил. Зі збільшенням навантаження такого генератора зменшується напруга на його затискачах внаслідок спаду напруги в його опорах та реакції якоря. Проте зі збільшенням навантаження зростає також сила струму в послідовній обмотці збудження. Тому за узгодженого приєднання обмоток збільшення навантаження обумовлюватиме зростання магнітного потоку та ЕРС якірної обмотки. Якщо ЕРС зі збільшенням навантаження зростає на величину, що дорівнює зниженню напруги генератора внаслідок спаду напруги в його опорі та реакції якоря, то напруга на затискачах генератора практично залишатиметься незмінною зі зміною навантаження від холостого ходу до номінального (крива 1). Такий генератор, що називається нормальним збудженням, не потребує регулювання сили струму збудження зі зміною навантаження. Якщо зменшуватиметься кількість витків послідовної обмотки, ЕРС зі зростанням навантаження збільшуватиметься меншою мірою і не компенсуватиме зниження напруги, отже, напруга на затискачах генератора зменшуватиметься (крива 2), тобто генератор буде незбуджений. Коли кількість витків послідовної обмотки збудження більша від тієї, яка відповідає нормальному збудженню машини, то генератор буде перезбудженим і напруга на його затискачах підвищуватиметься зі збільшенням навантаження (крива 3).

У разі зустрічного приєднання обмоток збудження зовнішня характеристика схожа на зовнішню характеристику генератора паралельного збудження (крива 4), проте сили струмів — максимальна I_{max} та короткого замикання I_k — у цього генератора будуть меншими від аналогічних сил струмів генератора паралельного збудження

внаслідок розмагнічувальної дії магніторушійних сил послідовної обмотки.

Найчастіше застосовують генератори нормально збуджені, а також перезбуджені, які дають змогу компенсувати спад напруги в лінії, з'єднувальних проводах тощо, щоб напруга на навантаженні залишалась сталою зі зміною сили струму.

Генератори з зустрічним приєднанням обмоток збудження не забезпечують сталості напруги, тому широкого застосування не мали. Їх використовують у тих випадках, коли потрібно обмежити силу струму короткого замикання (наприклад, в електрозварюванні).

Регульовальна характеристика генератора являє собою залежність сили струму збудження від сили струму навантаження за сталої напруги на затискачах генератора. Регульовальна характеристика генератора показує, як потрібно змінити силу струму в обмотці збудження для того, щоб напруга на затискачах генератора залишалася сталою зі зміною сили струму навантаження.

У генераторах незалежного й паралельного збудження зі збільшенням сили струму навантаження потрібно збільшувати силу струму збудження, для того щоб компенсувати спад напруги на внутрішньому опорі машини та розмагнічувальну дію якірної реакції.

У генераторах змішаного збудження (нормально збуджених) напруга зі зміною навантаження не зазнає змін, отже, потреба в регулюванні сили струму збудження відпадає.

§ 83. РОБОТА МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В РЕЖИМІ ДВИГУНА

Під час ввімкнення двигуна постійного струму в мережу під дією прикладеної напруги протікає струм у якірній обмотці та в обмотці збудження. Струм збудження утворює магнітний потік полюсів. Внаслідок взаємодії струму в провідниках якірної обмотки з магнітним полем полюсів виникає обертаючий момент і якір машини починає обертатися. Отже, електрична енергія перетворюється в механічну.

Припустимо, що генератор паралельного збудження ввімкнено в мережу великої потужності (рис. 112). Сила струму навантаження генератора $I = (E - U) / R_a$, де I — сила струму в якірній обмотці; R_a — опір цієї обмотки; E — ЕРС, що індукуються в цій обмотці; U — напруга в мережі.

Напрямок ЕРС і струму в активних провідниках якоря наведено на схемі (рис. 113, а). Машинна розвиває електромагнітний момент M_e , який є гальмівним, тобто споживає механічну енергію і виробляє електричну (режим генератора).

Якщо знизити силу струму збудження, то зменшаться магнітний потік та ЕРС, індукована в якірній обмотці. Це обумовить зменшення навантаження генератора. Змінюючи опір регульовального реоста-

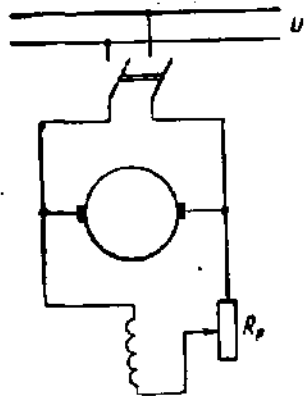


Рис. 112. Схема ввімкнення генератора паралельного збудження в мережу.

та, можна довести силу струму збудження до такого значення, за якого ЕРС у якірній обмотці дорівнює напрузі в мережі ($E = U$) і сила струму в якорі дорівнює нулеві, тобто генератор працює вхолосту.

Якщо сила струму збудження менша від сили струму, яка відповідає холостій роботі генератора, то ЕРС якірної обмотки буде меншим від напруги в мережі і струм у якорі змінить напрямку на зворотний (рис. 113, б). У разі зміни напрямку струму в провідниках якірної обмотки зміниться також напрямку електромагнітного моменту M_e , що розвивається машиною, тобто момент стане обертаючим. Отже, машина, споживаючи електричну енергію, виробляє механічну енергію, тобто працює двигуном. Якщо вимкнути первинний двигун, то якір машини продовжуватиме обертатися під дією електромагнітного моменту M_e , що розвивається.

Якщо вимкнути первинний двигун, то якір машини продовжуватиме обертатися під дією електромагнітного моменту M_e , що розвивається.

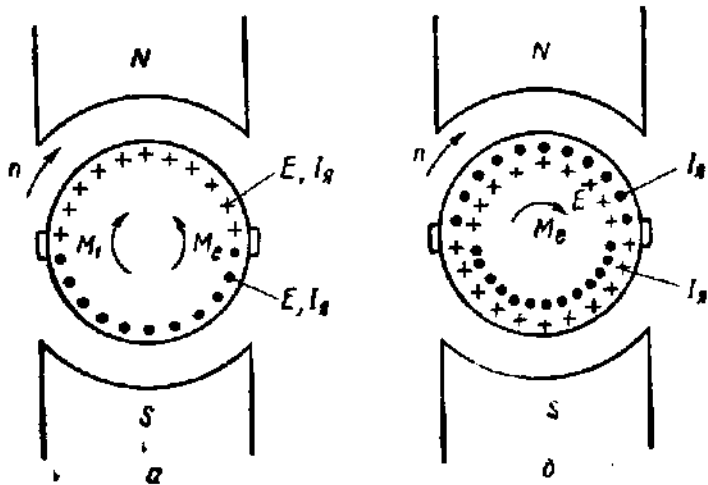


Рис. 113. Схеми роботи машини постійного струму в режимах: а — генератора; б — двигуна.

Під час обертання якора в провідниках його обмотки індукуються ЕРС, напрямку якої протилежний напрямкові струму. Тому її називають проти-ЕРС або зворотною ЕРС. Ця ЕРС відіграє роль регулятора споживаної потужності, тобто сила споживаного струму змінюється

внаслідок зміни проти-ЕРС $E = c\Phi$. Обертаючий момент, що розвивається двигуном, $M_e = KI\Phi$.

Прикладена напруга зрівноважується проти-ЕРС і спадом напруги в опорі якірної обмотки та щіткових контактів. Отже, $U = E + IR_a$.

Сила струму в обмотці та частота обертання якора визначаються за виразами

$$I = (U - E)/R_a \text{ та } n = (U - IR_a)/(c\Phi).$$

Умовою усталеного режиму двигуна є однаковість обертаючого й гальмівного моментів. Якщо обертаючий момент M_e , що розвивається двигуном, зрівноважений гальмівним моментом на валі M_r , то частота обертання якора залишається сталою. У разі порушення рівноваги моментів з'являється додатковий момент, який створює додатке або від'ємне прискорення обертання якора. Якщо збільшити навантаження (гальмівний момент на валі двигуна M_r), то рівновага моментів порушиться ($M_e < M_r$) і частота обертання якора почне знижуватися. При цьому зменшується також проти-ЕРС, що обумовлює збільшення сили струму в якорі та обертаючого моменту двигуна. Зміна частоти обертання, проти-ЕРС і сили струму в якорі відбувається до відновлення рівноваги моментів, тобто доти, поки обертаючий момент не дорівнюватиме знову гальмівному моменту на валі двигуна.

Якщо рівновага моментів не відновлюється і гальмівний момент залишається більшим від обертаючого моменту ($M_r > M_e$), то частота обертання зменшується безперервно до зупинки двигуна. Такі випадки можуть виникати при великих гальмівних моментах на валі і значних зниженнях напруги в мережі.

Зі зменшенням навантаження на валі двигуна ($M_e > M_r$) обертання якора почне прискорюватися, що обумовить збільшення проти-ЕРС у його обмотці. Знизяться сила струму в якірній обмотці та обертаючий момент двигуна. Зміна частоти, проти-ЕРС та сили струму в якорі протікатиме також до відновлення рівноваги моментів ($M_e = M_r$).

Проте у двигунах постійного струму порівняно часто створюються умови, за яких рівновага моментів не відновлюється з будь-якою зміною частоти, тому обертаючий момент завжди залишається більшим від гальмівного моменту на валу двигуна ($M_e > M_r$). У таких випадках частота обертання якора безперервно збільшується, теоретично прагнучи до нескінченності. Практично в разі значного перевищення номінальної частоти машина руйнується — розриваються бандажі, що скріплюють лобові з'єднання обмотки, провідники обмотки виходять із пазів тощо. Такий аварійний режим називається розносом двигуна.

Напрямок обертання якора залежить від полярності полюсів та від напрямку струму в провідниках якірної обмотки. Отже, для реверсування двигуна, тобто для зміни напрямку обертання якора, потріб-

но або змінити полярність полюсів, перемкнувши обмотку збудження, або змінити напрямок струму в якірній обмотці.

Обмотка збудження має значну індуктивність і перемикання її небажане. Тому двигуни постійного струму реверсують перемиканням якірної обмотки.

§ 84. ПУСК ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

У початковий момент пуску якір двигуна нерухомий і проти-ЕРС дорівнює нулеві ($E = 0$). З безпосереднім увімкненням двигуна в мережу в якірній обмотці протікатиме струм великої сили $I_{\text{пуск}} = U/R_a$. Тому безпосереднє увімкнення в мережу допускається лише для двигунів дуже малої потужності, у яких спад напруги в якорі відносно високий і зміни сили струму не дуже значні.

У машинах постійного струму великої потужності спад напруги в якірній обмотці за повного навантаження становить кілька процентів номінальної напруги, тобто $IR_a = (0,02 \dots 0,1) U$. Отже, сила пускового струму в разі увімкнення двигуна в мережу з номінальною напругою в багато разів перевищує номінальну силу струму.

Щоб обмежити силу пускового струму, для пуску двигуна використовують реостати, які з'єднують послідовно з якором. Пускові реостати являють собою дрітні опори, які розраховані на короткочасний режим роботи. Їх виконують ступінчастими, що дає змогу змінювати силу струму в якорі у процесі пуску двигуна.

Схему двигуна паралельного збудження з пусковим реостатом наведено на рис. 114, а. У пускового реостата три затискачі, позначені літерами Л, Я, Ш. Затискач Л з'єднаний з повзунком реостата й приєднаний до одного з полюсів рубильника (до лінії). Затискач Я з'єднаний з опором реостата і приєднаний до якірного затискача. Затискач Ш з'єднаний з металовою шинною, розміщеною на реостаті (шупт). Повзун реостата ковзає по шині так, що між ними встановлюється безперервний контакт. До затискача Ш приєднується обмотка збудження. Інші затискачі якоря та обмотки збудження з'єднані між собою перемичкою й під'єднані до другого полюса рубильника, який вмикає двигун у мережу.

Для пуску вмикається рубильник і повзун реостата переводиться на контакт 1. Від цього послідовно з якором буде з'єднано повний опір пускового реостата ПР, який вибирають таким, щоб найбільша сила струму під час пуску I_{max} не пере-

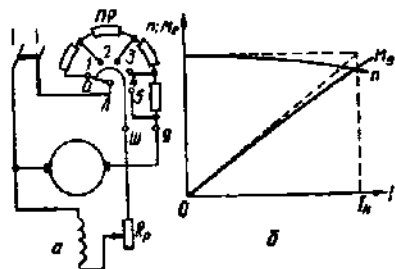


Рис. 114. Схема (а) та характеристики (б) двигуна паралельного збудження з пусковим реостатом.

вищувала номінальної сили струму більш як у 1,7...2,5 раза, тобто $R_p = (U/I_{\text{max}}) - R_a$.

Під час увімкнення двигуна в мережу по обмотці збудження також протікає струм, який збуджує магнітний потік. Внаслідок взаємодії струму в якорі з магнітним полем полюсів виникає пусковий момент.

Якщо пусковий момент виявиться більшим від гальмівного моменту на валі двигуна ($M_{\text{пуск}} > M_T$), то якір машини почне обертатися. Під дією інерції частота обертання не може зазнавати миттєвих змін і поступово збільшуватиметься. Разом з нею зростає проти-ЕРС, а сила струму в якорі почне зменшуватися, що обумовить зниження обертаючого моменту двигуна.

У робочому режимі опір пускового реостата має бути повністю виведений, оскільки він розрахований на короткочасний режим роботи і в разі тривалого протікання струму вийде з ладу.

Коли сила струму в якорі знизиться до невеликого значення I_{min} , повзун пускового реостата переводиться на контакт 2. При цьому опір пускового реостата зменшиться на один ступінь, що збільшить силу струму. Опір усіх ступенів пускового реостата вибирають таким, щоб із переведенням повзуна з одного контакту на інший сила струму в якорі змінювалася від I_{min} до I_{max} .

Зі збільшенням сили струму в якорі зростає обертаючий момент, внаслідок чого частота обертання знову підвищиться. З підвищенням частоти обертання якоря зростає проти-ЕРС, що обумовить зменшення сили струму в якорі. Коли сила струму в якорі досягне знову найменшого значення, повзун реостата переводиться на контакт 3. Отже, опір пускового реостата поступово (ступенями) зменшується, поки він повністю не буде виведений (повзун реостата на контакті 5), і в робочому режимі сила струму і частота обертання якоря набирають ustalених значень, які відповідають гальмівному моменту на валі двигуна.

Найменша сила струму в процесі пуску двигуна залежить від режиму його роботи. Якщо двигун пускають з повним навантаженням, то $I_{\text{min}} = I_n$. У разі пуску двигуна без навантаження або з малим навантаженням ця сила струму може бути меншою від номінальної сили струму двигуна.

Кількість ступенів пускового реостата залежить від різниці $I_{\text{max}} - I_{\text{min}}$, причому чим менша ця різниця, тим більша кількість ступенів. Звичайно пускові реостати мають від 2 до 7 ступенів. Для пуску двигуна регульовальний резистор R_p у колі збудження має бути повністю виведений, тобто сила струму збудження повинна бути найбільшою, що дає змогу знизити силу пускового струму. Крім того, потрібно утворити пусковий момент, який був би більшим від гальмівного моменту на валі. Оскільки $M_{\text{пуск}} = K I_{\text{пуск}} \Phi$, то для зменшення сили пускового струму треба збільшити магнітний потік, тобто збільшити силу струму в обмотці збудження.

Для вимкнення двигуна в мережі металева шина пускового реостата має бути з'єднана з затискачем I . Це потрібно для того, щоб не було розриву в колі обмотки збудження, яка має значну індуктивність. Крім того, повзун пускового реостата переводиться на холостий контакт θ , і рубильник вимикається. При цьому обмотка збудження буде замкнена на опір пускового реостата і якоря, що дає змогу уникнути перенапруг і дугоутворень.

§ 85. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Робочі властивості двигунів обумовлюються їх робочими характеристиками, які являють собою залежності частоти обертання n , обертаючого моменту M_e , сили споживаного струму I , потужності P_1 та ККД η від корисної потужності на валі P_2 . Ці залежності відповідають природним умовам роботи двигуна, тобто коли машина не регулюється і напруга в мережі залишається сталою. Зі зміною корисної потужності P_2 (тобто навантаження на валі) змінюється й сила струму в якорі машини, тому робочі характеристики часто будуються залежно від сили струму в якорі. Залежності обертаючого моменту та частоти обертання від сили струму в якорі для двигуна паралельного збудження зображено на рис. 114, б.

Частота обертання двигуна визначається виразом

$$n = (U - IR_a) / (c\Phi).$$

Зі збільшенням навантаження на валі двигуна зростає й сила струму в якорі. Це обумовлює збільшення спаду напруги IR_a в опорі якорної обмотки й щіткових контактів. Оскільки сила струму збудження залишається незмінною (машина нерегульована), то магнітний потік також сталий. Проте зі збільшенням сили струму в якорі зростає розмагнічувальна дія потоку якорної реакції й магнітний потік Φ дещо зменшиться. Збільшення IR_a обумовлює зменшення частоти обертання двигуна, а зменшення Φ підвищує частоту обертання. Спад напруги впливає на зміну частоти дещо більшою мірою, ніж реакція якоря, тому зі збільшенням сили струму в якорі частота зменшується. Зміна частоти обертання у двигуна цього типу незначна й не перевищує 5% зі зміною навантаження від нуля до номінального, тобто у двигунів паралельного збудження жорстка швидкісна характеристика.

Обертаючий момент двигуна $M_e = K\Phi$. За незмінного магнітного потоку залежність моменту від сили струму в якорі можна подати прямою лінією. Але під дією якорної реакції зі збільшенням навантаження дещо мірою зменшується магнітний потік, і залежність моменту відхилиться вниз від прямої лінії.

Схему двигуна послідовного збудження наведено на рис. 115, а.

У пускового реостата цього двигуна лише два затискачі, бо обмотка збудження та якор утворюють одне послідовне коло. Характеристики двигуна зображено на рис. 115, б. Частота обертання двигуна послідовного збудження визначається виразом

$$n = [U - I(R_a + R_c)] / (c\Phi),$$

де R_c — опір послідовної обмотки збудження.

У двигуна послідовного збудження магнітний потік не залишається сталим, а різко змінюється зі зміною навантаження, що обумовлює значну зміну частоти обертання. Оскільки спад напруги в якорному опорі та в обмотці збудження дуже малий порівняно з прикладеною напругою, то частоту обертання можна приблизно визначити за виразом $n \approx U / (c\Phi)$.

Якщо знехтувати насиченням сталі, то можна вважати магнітний потік прямо пропорційним силі струму збудження, яка дорівнює силі струму в якорі. Отже, у двигуна послідовного збудження частота обертання обернено пропорційна силі струму в якорі і різко зменшується зі збільшенням навантаження, тобто у двигуна м'яка швидкісна характеристика. Зі зменшенням навантаження частота обертання двигуна збільшується. На холостому ходу ($I = 0$) частота двигуна безмежно зростає, тобто двигун іде в рознос.

Характерною властивістю двигунів послідовного збудження є недопустимість скидання навантаження, тобто роботи вхолосту або з малими навантаженнями. Мінімальне допустиме навантаження двигуна становить 25...30% номінального. Якщо його навантаження менше за мінімальне допустиме, то частота обертання різко збільшується, а це може обумовити його руйнування. Тому, коли можливі скидання чи різні зменшення навантажень, двигуна послідовного збудження не застосовують. У двигунів дуже малих потужностей скидання навантаження не викликає розносу, бо для них механічні втрати будуть досить великим навантаженням.

Враховуючи прямо пропорційну залежність між магнітним потоком та силою струму в якорі ($\Phi = c'I$), обертаючий момент двигуна послідовного збудження можна визначити за формулою $M_e = K\Phi = K' I^2$, де $K' = Kc'$, тобто обертаючий момент прямо пропорційний квадратові сили струму. Проте в разі великої сили струму позначається насичення сталі і графік залежності моменту наближається до прямої лінії. Отже, двигуни цього типу розвивають великі обертаючі моменти, що має суттєве значення для пуску великих інерційних

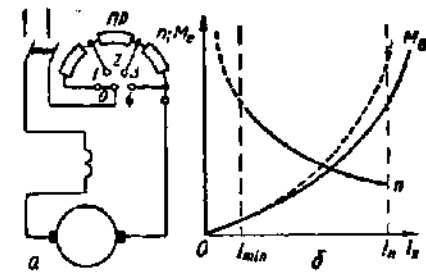


Рис. 115. Схема (а) та характеристики (б) двигуна послідовного збудження.

мас та наявності перевантажень. Ці двигуни широко використовують у транспортних та підймальних пристроях.

У двигунах змішаного збудження можливе узгоджене й зустрічне приєднання обмоток збудження. Двигуни з зустрічним приєднанням обмоток не набули широкого застосування, оскільки вони мають погані пускові властивості і працюють нестійко. Характеристики двигунів змішаного збудження займають проміжне положення між характеристиками двигунів паралельного й послідовного збудження.

У двигунів постійного струму є можливість плавно й економно регулювати частоту обертання в широких межах. Завдяки такій цінній властивості вони набули поширення і часто незамінні.

Частоту обертання якоря двигуна з будь-якою схемою збудження визначають за виразом $n = \{U - I(R_a + R_c)\} / (c\Phi)$, де R_c — опір послідовної обмотки збудження (для двигуна паралельного збудження $R_c = 0$). Цей вираз показує, що частота обертання двигуна залежить від напруги в мережі, опору якорного кола та магнітного потоку.

Частоту обертання регулюють, змінюючи напругу в мережі, у тому випадку, коли джерелом електричної енергії двигуна є будь-який генератор.

Для регулювання частоти обертання двигуна зміною опору якорного кола використовують регулювальний реостат, з'єднаний послідовно з якорем. На відміну від пускового регулювального реостата потрібно розраховувати на тривале протікання струму. В опорі регулювального реостата відбуваються великі втрати енергії, внаслідок чого різко знижується ККД двигуна.

Частоту обертання якоря регулюють також зміною магнітного потоку, який залежить від сили струму в обмотці збудження. У двигунів паралельного й змішаного збудження для цього приєднують регулювальний реостат, а у двигунів послідовного збудження шунтують обмотку збудження будь-яким регульованим опором. Цей спосіб регулювання частоти практично не створює додаткових втрат і економичний.

§ 36. ВТРАТИ ТА ККД МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

У машинах постійного струму в процесі роботи відбуваються втрати енергії, які мають три складові.

Першою складовою є втрата у сталі $P_{ст}$ на гістерезис та вихрові струми, що виникають у якорному осердді. Під час обертання якоря сталь його осердя безперервно перемагнічується. На її перемагнічування витрачається потужність, що називається втратами на гістерезис. Водночас під час обертання якоря в магнітному полі в його осердді індукуються вихрові струми. Втрати на гістерезис та вихрові струми, що називаються втратами в сталі, перетворюються в теплоту і нагрівають якорне осерддя.

Втрати в сталі залежать від магнітної індукції та частоти перемагнічування якорного осердя. Магнітна індукція обумовлює ЕРС машини або, інакше, напругу, а частота перемагнічування залежить від частоти обертання якоря. Тому під час роботи машини постійного струму в режимі генератора або двигуна втрати в сталі будуть сталими, не залежними від навантаження, якщо напруга на якорних затискачах і частота обертання якоря будуть сталі.

До другої складової належать втрати енергії на нагрівання проводів обмотки збудження та якорної обмотки струмами, що протікають по них. Вони називаються втратами в міді $P_{об}$.

Втрати в якорній обмотці та в щіткових контактах залежать від сили струму в якорі, тобто є змінними — міняються зі зміною навантаження.

Третя складова — механічні втрати $P_{мех}$ являють собою втрати енергії на тертя в підшипниках, тертя обертових частин об повітря та щіток об колектор. Ці втрати залежать від частоти обертання якоря. Тому механічні втрати також сталі й не залежать від навантаження.

ККД машини в процентах $\eta = P_2 / P_1 \cdot 100\%$, де P_2 — корисна потужність; P_1 — потужність, споживана машиною.

Під час роботи машини в режимі генератора корисна потужність $P_2 = UI$, де U — напруга на затискачах генератора; I — сила струму в навантаженні. Споживана потужність $P_1 = UI + P_{ст} + P_{об} + P_{мех}$ і ККД

$$\eta = \frac{UI}{UI + P_{ст} + P_{об} + P_{мех}} \cdot 100\%$$

Якщо машина працює в режимі двигуна, то споживана потужність $P_1 = UI$, корисна потужність $P_2 = UI - P_{ст} - P_{об} - P_{мех}$, а ККД

$$\eta = \frac{UI - P_{ст} - P_{об} - P_{мех}}{UI} \cdot 100\%$$

§ 37. УНІВЕРСАЛЬНІ КОЛЕКТОРНІ ДВИГУНИ

Принципово будь-який двигун постійного струму може працювати від мережі змінного струму, оскільки обертаючий момент, що розвивається двигуном і залежить від добутку сили струму в якорі на магнітний потік полюсів, не змінює напрямку за одночасної зміни напрямку струму в якорі та магнітного потоку полюсів.

Для створення досить великого обертаючого моменту потрібна одночасна зміна напрямку струму в якорі та магнітного потоку полюсів, тобто збіг за фазою сили струму в якорі та магнітного потоку полюсів. У двигуні паралельного збудження такого збігу за фазою досягнути не можна, через те що магнітний потік, який утворюється обмоткою збудження, відстає за фазою від прикладеної напруги

приблизно на чверть періоду. У двигуні послідовного збудження струм у якорі є водночас і струмом збудження. Нехтуючи кутом зсуву фаз між силою струму збудження та магнітним потоком, можна вважати, що сила струму в якорі та магнітний потік збігаються за фазою, тобто їхні зміни одночасні.

Колекторні двигуни малих потужностей роблять універсальними, тобто вони призначаються для роботи від мережі змінного і постійного струму. Такі двигуни виконують без компенсаційної обмотки. У разі роботи від мережі постійного струму двигуна приєднують затискачами «0» та «=» (рис. 116), а якщо від мережі змінного струму — затискачами «0» та «~». Отже, в разі роботи на змінному струмі в обмотці збудження значно менше витків, ніж за роботи на постійному струмі, тому коефіцієнт потужності виявляється порівняно високим, незважаючи на відсутність компенсаційної обмотки.

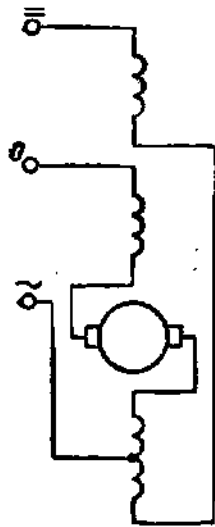


Рис. 116. Схема універсального двигуна.

Характеристики універсального колекторного двигуна змінного струму аналогічні характеристикам двигуна постійного струму з послідовним збудженням.

Однофазні колекторні двигуни змінного струму малої потужності застосовуються в установках автоматики, зв'язку та в побуті. У конструктивному відношенні вони мають суттєві відмінності від машин постійного струму. Магнітопрвід статора колекторного двигуна набирають із листової сталі для зменшення втрат на вихрові струми. Потік якорної реакції утворює ЕРС самоіндукції, яка значною мірою знижує коефіцієнт потужності. Щоб усунути вплив якорної реакції,

на статорі колекторного двигуна розміщують компенсаційну обмотку, магнітний потік якої спрямований назустріч потоку якорної реакції. Компенсаційна обмотка може бути з'єднана послідовно з якорем і може мати з ним трансформаторний зв'язок; крім того, на статорі може бути одна обмотка, яка одночасно є й обмоткою збудження, і компенсаційною.

Іноколи застосовують двигуни з трансформаторним зв'язком статора й ротора, які називаються індукційними, або репульсійними колекторними двигунами. Такі двигуни застосовують переважно у побутових пристроях для безпосереднього вмикання в мережу змінного струму. У таких двигунів обмотка, що вмикається в мережу, служить одночасно обмоткою збудження і компенсаційною, а якорна обмотка коротко замкнена щітками на колекторі.

Контрольні запитання

1. Від чого залежить ЕРС машини постійного струму?
2. Для чого встановлюють додаткові полюси?
3. Як протікає процес самозбудження генератора?
4. Зобразіть і поясніть зовнішні характеристики генераторів.
5. Як здійснити реверсування двигуна постійного струму?
6. Від чого залежать обертаючий момент та частота обертання двигуна постійного струму?
7. Зобразіть і поясніть характеристики двигунів постійного струму.
8. Як регулюють частоту обертання двигунів постійного струму?

Розділ ІХ. ЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ

§ 88. ЕЛЕКТРОННА ЕМІСІЯ

В електронних лампах протікання струму пов'язане з переміщенням електронів у вакуумі, який є непровідним середовищем. Під вакуумом розуміють такий високий ступінь розрідження повітря або газу, за якого електрони рухаються без зіткнення з молекулами газу. Джерелом електронів у електронних лампах служить металевий електрод — катод, з поверхні якого електрони виходять у навколишнє середовище. У металах навколо атомів є слабо зв'язані з ними електрони. За нормальної температури та відсутності зовнішнього електричного поля електрони з катода не виходять через недостатність кінетичної енергії. Невня частина електронів з найбільшою енергією виходить за межі металу, утворюючи електронний шар навколо катода, який разом з розташованим на поверхні катода шаром позитивних іонів (атомів, які позбавлені електронів) утворює деяку різницю потенціалів, що називається потенціальним бар'єром. Ця різниця потенціалів перешкоджає виходу електронів за межі провідника.

Для виходу з катода електронам потрібно надати енергії, яка дорівнює роботі на подолання гальмівної дії електричного поля або потенціального бар'єру. Ця енергія називається роботою виходу W_a , а її відношення до електронного заряду — потенціалом виходу $\phi_a = W_a/e$. Залежно від способу надання електронам додаткової енергії для виходу з катода розрізняють такі види емісії: термоелектронну, вторинну, від ударів важких часток, автоелектронну, фотоелектронну.

Термоелектронною емісією називається явище виходу електронів із катода під час його нагрівання. З підвищенням температури металу швидкість руху електронів та їх кінетична енергія зростають і кількість електронів, які залишають катод, збільшується.

Вторинна електронна емісія — це явище виходу вторинних електронів від дії ударів первинних електронів об поверх-

ню тіла. Летючі первинні електрони ударяються об поверхню провідника й проходять у його поверхневий шар, віддаючи частину своєї енергії вторинним електронам провідника. Якщо внаслідок зіткнення вторинні електрони матимуть енергію, вищу від роботи виходу, то вони вийдуть за межі провідника. Оскільки первинний електрон, який має значну енергію, може віддати її одному чи кільком електронам, то кількість вторинних електронів може бути більшою, ніж первинних.

Електронною емісією від ударів важких часток називається явище виходу електронів під дією ударів іонів або збуджених атомів (молекул) об поверхню провідника, тобто цей вид емісії подібний до вторинної електронної емісії.

Під автоелектронною емісією розуміють явище виходу електронів із катода під дією сильного електричного поля біля його поверхні. Сила, що діє на електрон, який перебуває в електричному полі, прямо пропорційна зарядові електрона й напруженості поля. Тому за досить великої напруженості електричного поля сили, що діють на електрон, стають достатніми для подолання потенціального бар'єру та виходу їх із холодного катода.

Фотоелектронна емісія — це явище виходу електронів під дією випромінювання, яке поглинається катодом, коли електрони катода отримують додаткову енергію для виходу від часток світла — фотонів. Промениста енергія випускається й поглинається певними порціями — квантами. Якщо енергія кванта більша від роботи виходу, то електрон може залишити катод. Явище виходу електронів із катода під дією світлової енергії називається фотоефектом.

Усі електрони, що вилітають із катода за одиницю часу, відводяться від нього зовнішнім електричним полем і утворюють електричний струм емісії. З підвищенням температури катода та зі збільшенням енергії первинних електронів або важких часток, напруженості прискорюваного поля поблизу катода і світлового потоку сила струму емісії зростає, оскільки збільшується кількість емітованих (таким, що вилетіли з катода) електронів. Якщо ж зовнішнього прискорюваного поля немає й емітовані електрони не віддаляються від катода, то вони накопичуються навколо нього, утворюючи об'ємний негативний заряд (електронну хмару), який створює поблизу катода гальмівне електричне поле, що перешкоджає виходу електронів із катода.

§ 89. ЕЛЕКТРОДИ ЕЛЕКТРОВАКУУМНИХ ЛАМП

Електроди електронних ламп — це катоди, аноди та сітки.

Катод лампи, який емітує електрони, характеризується такими основними параметрами, як максимальна густина катодного струму, ефективність, робоча температура та довговічність.

Катодний струм являє собою електронний потік, спрямований від катода до інших електродів. Для збільшення довговічності електронної лампи потрібно, щоб максимальний катодний струм був значно меншим від певного емісійного струму катода. Максимально допустимий катодний струм, що припадає на одиницю площі поверхні катода, який емітує електрони, називається **максимальною густиною катодного струму**, яка в сучасних електронних лампах становить $0,1 \dots 1 \text{ А/см}^2$.

Ефективність катода показує силу його емісійного струму в міліамперах на 1 Вт потужності, витраченої на розігрівання катода: $H = I_{\text{кmax}}/U_p I_p$, де $I_{\text{кmax}}$ — максимальна сила емісійного струму катода; I_p та U_p — сила струму та напруга розжарення. Чим вища ефективність, тим більшу силу емісійного струму можна одержати від нього з меншою витратою потужності в колі розжарення. Ефективність катода становить $2 \dots 100 \text{ мА/Вт}$.

Робоча температура також обумовлює економічність катода. Чим нижча робоча температура катода, тим менша потужність потрібна для його нагрівання. Звичайно робоча температура становить $1000 \dots 2500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Довговічність катода характеризується часом, протягом якого катод може безперервно працювати, зберігаючи свої найважливіші параметри в межах установлених норм.

Термоелектронні катоди (до 50 основних типів) за родом емітуючих поверхонь можна поділити на чотири групи: металеві, металоплівкові, напівпровідникові та складні (металонапівпровідникові та металокерамічні).

Металеві (або однорідні) катоди неактивовані й найменш економічні, але добре працюють у складних температурних умовах, мають високу стійкість до бомбардування їх іонами залишкових газів під дією сильних електричних полів. Їх застосовують у потужних лампах та в тих випадках, коли потрібна висока стабільність параметрів катода в часі. Для виготовлення металевих катодів використовують метали з високою температурою плавлення, які характеризуються такими механічними властивостями, як міцність, ковкість, тягучість. Найпоширенішим типом металевого катода є вольфрамовий (робоча температура — $2500 \text{ }^\circ\text{C}$, температура плавлення — $3395 \text{ }^\circ\text{C}$). Рідше матеріалом катода служать тантал та ніобій.

Металоплівкові катоди являють собою металеву поверхню, покриту одним або кількома шарами речовини з позитивним зарядом, який утворює електричне поле, що знижує роботу на вихід електронів.

Найпоширенішими металоплівковими катодами є карбидовані та барієво-вольфрамові. Такі катоди економічніші від металевих, але поступаються їм відносно стабільності параметрів та механічної міцності.

Напівпровідникові катоди високоєфективні й набули дуже широкого застосування. Їх основа покрита відносно товстим шаром активної речовини з електропровідністю електронного типу. До напівпровідникових катодів належать оксидний та торієво-оксидний.

Складні катоди можуть бути металонапівпровідниковими, виконаними на основі оксидних катодів, та металокерамічними. Оксидні катоди поділяються на дві групи: перша — катоди зі складної пористої структури, насиченої активною масою; друга — оксидно-нікелеві катоди, одержані на основі пресування карбонатів та нікелевого порошку з подальшою обробкою й активуванням.

Металокерамічні катоди виготовляють із порошоків вольфраму, оксиду торію і кераміки способом пресування та спікання при високій температурі.

За своєю конструкцією катоди можуть бути прямого та непрямого розжарення; катоди непрямого розжарення називають підігрівними. У катодах прямого розжарення волосок розжарення є емітуючою поверхнею. Їх застосовують у лампах великої потужності і виконують із дроту або стрічки, яким надають різноманітної форми: нитки, решітки, Л- або М-подібної, спіральної, білячого колеса. У катодах прямого розжарення мала маса, а отже, низька теплоємність, тому час їх розігрівання відносно невеликий і ефективність вища, ніж у катодах непрямого розжарення. Особливістю катодів прямого розжарення є їх нееквіпотенціальність, тобто зміна потенціалу вздовж волоска внаслідок спаду напруги від струму, що протікає по ньому. У разі живлення катодів прямого розжарення змінним струмом нееквіпотенціальність призводить до появи фону змінного струму в анодному колі лампи. До недоліків катодів прямого розжарення відносяться також мала площа емітуючої поверхні та недостатня жорсткість конструкції. Катоди прямого розжарення виконують металевими та активованими торієм або барієм.

У катодах непрямого розжарення емітуюча поверхня та підігрівник віддалені одне від одного і можуть бути електрично не зв'язані між собою. У них велика площа емітуючої поверхні та значна маса, що дає змогу одержати емісійний струм великої сили та високу теплову інерцію. Проте час розігрівання у них тривалий, а ефективність вижча, ніж у катодах прямого розжарення. Потенціал катода непрямого розжарення, однаковий на всій довжині, та фол змінного струму, обумовлений нееквіпотенціальністю поверхні, тут відсутні.

Анод є колектором електронів, які віддають йому кінетичну енергію, одержану ними у прискорюваному полі лампи. При цьому анод нагрівається і, щоб максимальна температура анода не перевищувала температури, встановленої для даної лампи, його охолоджують. Існує п'ять способів охолодження анода: випромінюванням через вакуум (анод знаходиться всередині балона), теплопровідністю через масивний вивід (анод знаходиться всередині скляного або мета-

локерамічного балона, на його вивід надіто радіатор), повітряне, водяне та пароводяне. У першому і другому випадках охолодження природне, у решти трьох — примусове потоком повітря, води або пари.

Гранично допустиму температуру анода вибирають залежно від його матеріалу, типу катода, способу охолодження, газовиділення з анода та матеріалу лампового балона.

Максимальна потужність, що розсіюється на аноді, $P_a = U_a I_a$, де I_a та U_a — сила анодного струму та напруга. Щоб температура анода не перевищувала допустиму, потрібно, щоб $P_a < P_{a, \text{доп}}$, тобто щоб потужність P_a , яка розсіюється на аноді, була меншою від допустимої $P_{a, \text{доп}}$ для даної лампи. Допустиму потужність, що розсіюється на аноді, встановлюють залежно від допустимої температури анода, його матеріалу, площі охолоджуваної поверхні, кольору цієї поверхні та способу охолодження.

Матеріалом анодів у лампах з невеликими навантаженнями служать нікель та алюміноване залізо, а в лампах з великими навантаженнями за природного охолодження — молібден, тантал і титан, за штучного охолодження — мідь. В іонних приладах, крім цього, використовують графіт. Конструктивно анодам електронних ламп надають циліндричної, еліптичної чи коробчастої форми.

Сітки електровакуумних ламп виготовляють спіральними, рамочними та штампованими. Спіральні сітки накручують із дроту різного діаметра на спеціальних автоматах і зварюють із траверсами (тримачами) точковим зварюванням. Для виготовлення рамочних сіток на рамку натягують дріт дуже малого діаметра; такі сітки завдяки своїй жорсткості дають змогу одержати дуже малі відстані між електродами. В електронних лампах може бути від однієї до шести сіток і кожна з них має своє призначення й назву. Залежно від призначення сіток матеріалом для них може бути вольфрам, молібден, сплави нікелю тощо.

Електроди електронних ламп розміщуються в б а л о н а х із скла (натрієвого, боросілікатного, свинцевого, кварцевого), яке широко застосовується завдяки своїм фізичним властивостям (малі теплопровідність і газовиділення) та низькій вартості. Застосовують також комбіновані оболонки — металоскляні та металокерамічні. Для комбінованих оболонок використовують сталь, мідь, алюміній і титан, а керамічні оболонки виготовляють з оксиду алюмінію, кремнезему, форстериту та стеатиту. Недоліками скла є невисока механічна міцність і термостійкість, внаслідок чого скло не витримує великих перепадів температур. Цих недоліків позбавлена металокерамічна конструкція, у якій малі діелектричні втрати, що дуже важливо для роботи на НВЧ (надвисокі частоти).

Щоб підтримувати в лампах високий вакуум, застосовують гетервбирач газів, що виділяються з електродів під час їх нагрівання або електроіонного бомбардування. Найпоширенішим гетером є

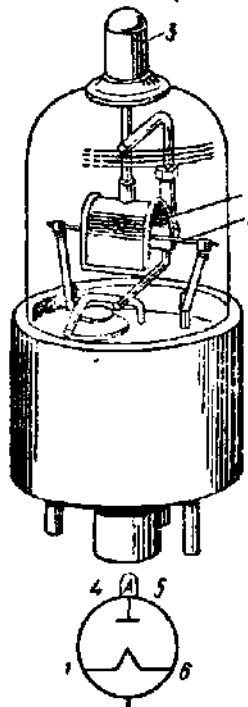
барію, який, зв'язуючи залишковий газ, осідає у вигляді оксидів і чистого барію на стінках колби, забарвлюючи її в сірвато-дзеркальний колір.

Колбу електронної лампи з електродами розміщують на ц о к о л і. По периферії цокола симетрично закріплюють вісім металевих штирків, а в центрі розміщують видовженого пластмасового штиря-ключа з виступом, який забезпечує правильне встановлення лампи. Штирки нумерують від виступу ключа за годинниковою стрілкою. До них приєднують лампові електроди, причому в багатьох ламп частини штирків немає. Схема з'єднання електродів зі штирками називається ц о к о л і в к о ю лампи й наводиться в довіднику.

У мініаторних (пальчикових) та надмініаторних ламп цокола немає, а виводи електродів виконують гнучкими проводами, які припаюють до відповідних точок схеми. При цьому відлік виводів провадять від кольорової позначки, нанесеної на одному з них.

§ 90. ДВОЕЛЕКТРОДНІ ЕЛЕКТРОННІ ЛАМПИ (ДІОДИ)

Діод є найпростішою електронною лампою, в колбі якої розмішено два електроди — анод і катод. Виводи електродів приєднуються до штирків, упресованих у пластмасовий цокол лампи, або проходять безпосередньо крізь цоколове скло. У високовольтних діодах анодний вивід розташований у верхній частині лампи (рис. 117), катод має форму волоска.



На рис. 118 наведено умовні позначення діодів з катодами прямого й непрямого розжарення. Аноди ламп з'єднують з одним штирком цокола, катод прямого розжарення — з двома штирками, катод непрямого розжарення — з трьома.

Катод або волоски розжарення (підігрівники) живляться від батареї розжарення B_p з напругою кілька вольт або від обмотки трансформатора. Нагрітий катод емітує електрони, які прямують до анода, якщо між анодом і катодом існує прискорюване електричне поле, тобто анод лампи з'єднаний з позитивним полюсом анодної батареї B_a , а катод — з негативним (рис. 119, а). Електрони, що емітуються катодом і досягають анода, утворюють у колі анодний струм силою I_a (діод відкритий), а різниця потенціалів між анодом і катодом лампи є анод-

Рис. 117. Будова діода ШІС (з цоколювкою): 1 — анод; 2 — катод; 3 — вивідний вивід.

ною напругою U_a . Напрямок анодного струму в лампі протилежний напрямкові руху електронів.

Якщо анод лампи з'єднати з негативним полюсом анодної батареї, а катод — з позитивним (рис. 119, б), то електричне поле між анодом і катодом лампи для електронів, що залишили катод, виявиться гальмівним і під дією цього поля електрони повертаються на катод, тобто струму в анодному колі не буде (діод закритий). У цьому випадку напруга, прикладена до лампи, називається зворотною анодною напругою.

Отже, струм через діод протікає лише в одному напрямку — від анода до катода, тобто діод має односторонню провідність, властиву електричним вентилем.

Якщо діод відкритий, то сила анодного струму зростає зі збільшенням анодної напруги. Залежність сили анодного струму від анод-

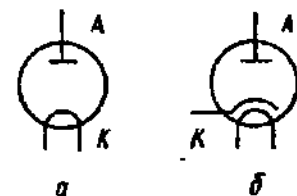


Рис. 118. Умовні позначення діодів на схемах: а — з катодом прямого розжарення; б — з катодом непрямого розжарення; А — анод; К — катод.

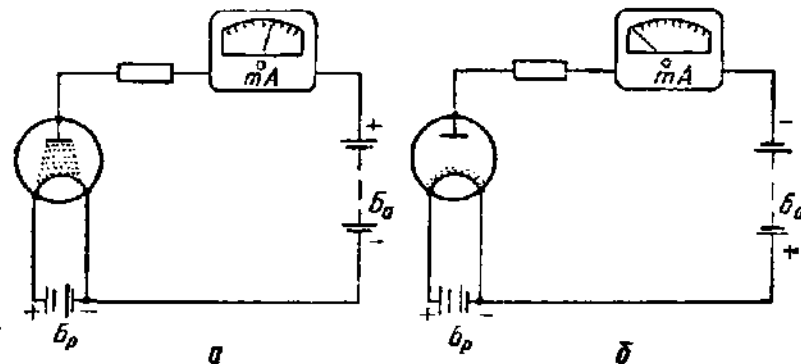


Рис. 119. Принцип дії діода: а — діод відкритий; б — діод закритий.

ної напруги $I_a = f(U_a)$ за незмінної напруги розжарення $U_p = \text{const}$ називається а н о д н о ю, або в о л ь т - а м п е р н о ю х а р а к т е р и с т и к о ю діода (рис. 120). Коли анодна напруга $U_a = 0$, то через діод протікає початковий струм діода незначної сили I_{a0} , який обумовлений електронами з запасом енергії, достатнім для досягнення анода. Щоб знизити цю силу струму до нуля, потрібно прикласти до лампи зворотну запиірну напругу $U_{зап}$ (до 1 В) для утворення гальмівного електричного поля. З підвищенням прямої (позитивної) анодної напруги сила струму, що протікає через лампу, збільшується спочатку незначною мірою, а потім зростає швидше, оскільки з підвищенням анодної напруги зменшується негативний заряд, який

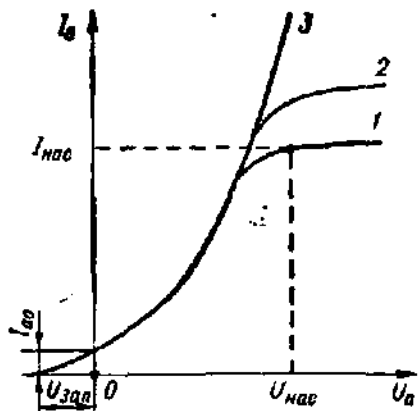


Рис. 120. Анодна характеристика діода.

перешкоджає рухові електронів, і збільшується напруженість прискорюваного електричного поля. Такий режим роботи лампи називається режимом просторового заряду. Якщо анодна напруга збільшується до значення, за якого всі емітовані електрони досягають анода, то настає режим насичення, в якому сила струму насичення $I_{нас}$ (крива 1) при вольфрамовому катоді практично не міняється, при барієвому — збільшується певною мірою, при оксидному — продовжує зростати (крива 3).

Зі збільшенням напруги розжарення ($U_{р2} > U_{р1}$) підвищується температура катода і електронна емісія зростає, внаслідок чого збільшується й сила струму насичення діода (крива 2).

Основні параметри лампи такі: крутість характеристики, внутрішній опір, допустима потужність, що виділяється на аноді, допустима зворотна напруга.

Крутістю характеристики називається відношення приросту сили анодного струму ΔI_a до відповідного приросту анодної напруги: $S = \Delta I_a / \Delta U_a$. У діодів різних типів крутість характеристики становить 1...50 мА/В.

Внутрішнім, або диференціальним опором діода називається відношення приросту анодної напруги до приросту сили анодного струму. Внутрішній опір обернено пропорційний крутісті характеристики, тобто $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a = 1/S$, і для діодів різних типів становить сотні омів.

Крутість, як і внутрішній опір діода, на різних ділянках характеристики через її нелінійність неоднакова. Для визначення S та R_i у робочій точці на вольт-амперній характеристиці знаходять відрізок ΔI_a і відповідний йому відрізок ΔU_a , відношення яких обумовлює крутість характеристики та внутрішній опір діода.

Потужність, що виділяється на аноді, $P_a = U_a I_a$ має бути меншою від допустимої потужності $P_{a доп}$. Для кожної лампи зазначають граничне значення потужності $P_{a доп}$, що розсіюється анодом, та найбільшу допустиму зворотну напругу $U_{зв}$, яка може бути прикладена до лампи в неспровідному напрямку без небезпеки її пробою. Якщо зворотна напруга стане більшою від допустимої, то може статися самостійний розряд і наступить пробій.

До параметрів лампи належать також номінальні напруга та сила струму розжарення.

Конструктивно діоди виготовляють одно- та двоанодними; двоанодні являють собою два діоди в одному балоні. У двоанодних діодів може бути один спільний або два ізольовані катоди.

Діоди застосовують для випрямлення змінного струму (кенотрони) та перетворення високочастотних коливань (високочастотні діоди для детектування, моделювання та перетворення частот).

Система позначення електровакуумних діодів: перша (цифра) показує (округлено) напругу розжарення; друга (літера) — тип лампи (Д — діод, Ц — кенотрон, Х — подвійний діод); третя (цифра) — порядковий номер даного типу приладу; четверта (літера) — конструктивне оформлення (С — скляна оболонка, К — керамічна оболонка, П — скляні надмініатюрні, Н — металокерамічна). Відсутність четвертого знака (літери) означає металеву оболонку.

§ 91. ТРИЕЛЕКТРОДНІ ЕЛЕКТРОННІ ЛАМПИ (ТРИОДИ)

Триод (рис. 121), крім анода й катода, має третій електрод — сітку, яка керує потоком електронів, тобто струмом лампи. Керуюча сітка розміщена між анодом і катодом ближче до катода. Часто в одному корпусі розміщують два триоди (рис. 122).

Різниця потенціалів між сіткою й катодом називається сітковою напругою. Якщо в діоді на електроні, що вилітає із розжареного катода, діють об'ємний заряд та електричне поле, утворене анодною напругою U_a , то в триоді електричне поле обумовлюється не тільки анодною, але й сітковою напругою U_c . Оскільки сітка розташована ближче до катода, то дія сіткової напруги на електричне поле між анодом і катодом буде дужчою від дії анодної напруги.

Якщо сіткова напруга $U_c = 0$, то електричне поле визначається анодною напругою. У разі додатної напруги на сітці ($U_c > 0$) на прискорюване поле, утворене анодною напругою, накладається прискорюване поле сітки так, що напруженість поля між сіткою й катодом зростає і сила анодного струму лампи збільшується. Проте, коли $U_c > 0$, частина емітованих електронів потрапляє на сітку й утворює в її колі сітковий струм силою I_c , який шкідливо впливає на робочий режим лампи.

Якщо на ламповій сітці буде від'ємний потенціал ($U_c < 0$), то на прискорюване поле, утворене анодною напругою, між катодом і сіткою накладатиметься гальмівне поле сітки, яке зменшує напруженість поля та силу анодного струму.

За певної анодної напруги U_a результуюче поле між сіткою й катодом обумовлюється сітковим потенціалом; при певній від'ємній напрузі U_c результуюче поле залишиться ще прискорюваним і між анодом і катодом протікатиме анодний струм. Зі збільшен-

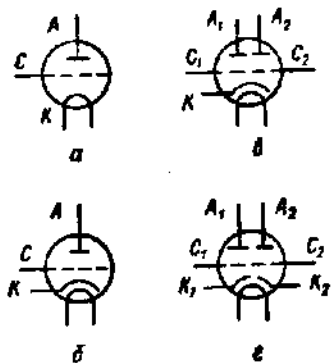


Рис. 121. Умовні позначення триодів:

а — з катодом прямого розжарення; б — з катодом непрямого розжарення; в — двох триодів з катодом непрямого розжарення; г — з відокремленими катодами; А — анод; К — катод; С — сітка.

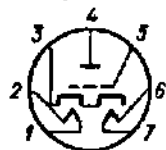
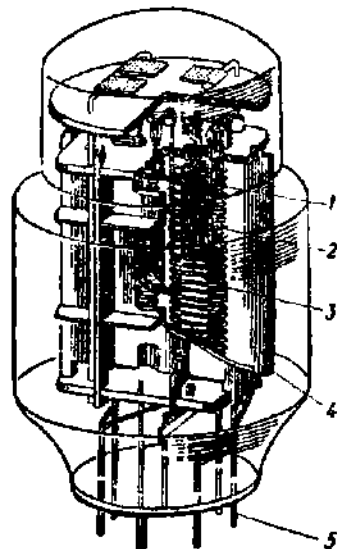


Рис. 122. Будова триодів 6С1 33С та їх цоколювка:

1 — підігрівач; 2 — катод; 3 — сітка; 4 — анод; 5 — зовнішні виводи.

ням від'ємної напруги U_c результуюче поле між сіткою й катодом ослабне і сила анодного струму знизиться. За певного значення від'ємної сіткової напруги, яке називається за п і р н и м ($U_c = U_s$), результуюче поле між сіткою й катодом стає гальмівним і сила анодного струму дорівнює нулеві, тобто лампа запирається.

На рис. 123, а зображено анодні характеристики триода, що являють собою залежність сили анодного струму від анодної напруги $I_a = f(U_a)$ при незмінній сітковій напрузі ($U_c = \text{const}$). Якщо сіткова напруга $U_c = 0$, анодна характеристика триода практично не відрізняється від анодної характеристики діода. За додатної напруги на сітці ($U_c > 0$) сила анодного струму зростає і характеристика розташовується лівіше від характеристики, знятої при $U_c = 0$, і тим вище, чим більша U_c . Якщо зняти анодну характеристику при деякій від'ємній сітковій напрузі ($U_c < 0$), то вона, зберігаючи форму й нахил, зміститься в площину вищих напруг, тобто розташується справа від характеристики, знятої при $U_c = 0$. У разі невеликих анодних напруг лампа запирається від'ємною сітковою напругою й відпирається, коли анодна напруга досягне значення U_{a1} , за якого прискорюванс анодне поле повністю компенсує гальмівне поле сітки. Чим біль-

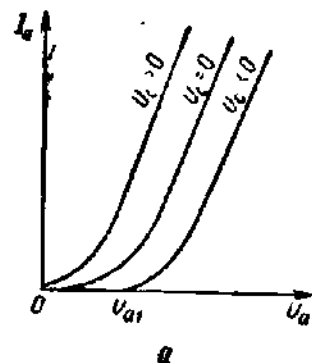
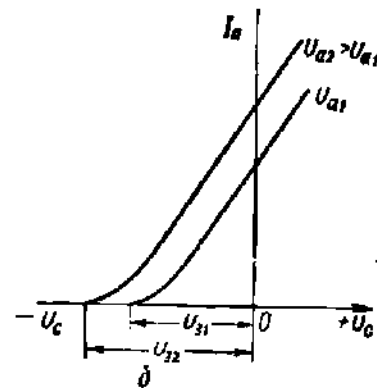


Рис. 123. Характеристики триода:

а — анодні; б — анодно-сіткові.



ша від'ємна напруга на сітці, тим вищою буде анодна напруга, за якої відпирається лампа.

Сукупність анодних характеристик, знятих для різних сіткових напруг, називається сім'єю анодних характеристик.

Анодно-сіткові характеристики (рис. 123, б) являють собою залежність сили анодного струму від сіткової напруги $I_a = f(U_c)$ і знімаються за незмінної анодної напруги ($U_a = \text{const}$). З характеристик видно, що чим більша анодна напруга, тим більшою має бути від'ємна сіткова напруга для запирання лампи.

До основних параметрів, що характеризують властивості триода, належать крутість, внутрішній опір та коефіцієнт підсилення.

Крутістю анодно-сіткової характеристики (крутістю триода) називається відношення приросту сили анодного струму ΔI_a до приросту сіткової напруги ΔU_c за незмінної анодної напруги, тобто $S = \Delta I_a / \Delta U_c$ при $U_a = \text{const}$. Крутість триода характеризує здатність сітки керувати анодним струмом.

Внутрішнім (або диференціальним) опором триода називається відношення приросту анодної напруги ΔU_a до обумовленого ним приросту сили анодного струму, ΔI_a за незмінної сіткової напруги, тобто $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a$ при $U_c = \text{const}$. Внутрішній опір характеризує вплив анодної напруги на силу анодного струму в лампі.

Коефіцієнтом підсилення триода називається відношення приросту анодної напруги ΔU_a до приросту сіткової напруги ΔU_c , яке обумовлює однаковий приріст сили анодного струму, тобто $\mu = \Delta U_a / \Delta U_c$ при $I_a = \text{const}$. Коефіцієнт підсилення показує, у скільки разів зміна сіткової напруги діє на силу анодного струму дужче, ніж зміна анодної напруги.

Між основними параметрами тріода існує така залежність:

$$SR_t = \Delta I_a / \Delta U_c - \Delta U_a / \Delta I_a = \Delta U_a / \Delta U_c = \mu.$$

У тріоді знаходяться три металеві електроди, між якими існують такі ємності: вхідна ємність сітка — катод $C_{с-к}$, вихідна ємність анод — катод $C_{а-к}$ та прохідна ємність анод — сітка $C_{а-с}$. Ці ємності залежать від розмірів і форми електродів, відстані між ними та інших показників. Звичайно ці ємності малі (до 10...20 пФ), але за високих частот ємнісні опори стають невеликими і сили ємнісних струмів помітно можуть збільшитися. Наприклад, вхідна ємність сітка — катод обумовлює емісійний струм в колі сітки та джерела вхідної напруги, що призводить до спаду напруги на внутрішньому опорі джерела і до зменшення напруги на вході тріода. Негативний вплив прохідної ємності $C_{а-с}$ полягає в тому, що з анодного кола через цю ємність відгалужується струм у коло сітки, тобто вихідна напруга діє на вхід лампи. Отже, будь-яка зміна анодної напруги через ємність $C_{а-с}$ діє на сіткове коло, що може спотворити підсилювані сигнали й викликати самозбудження підсилювача.

§ 92. БАГАТОСІТКОВІ ЕЛЕКТРОННІ ЛАМПИ

Недоліком тріода є його малий коефіцієнт підсилення. Щоб підвищити цей коефіцієнт, потрібно збільшити частоту намотування керуючої сітки, але при цьому зменшиться запірна напруга й анодно-сіткові характеристики змістяться вправо, де робота підсилювальної лампи стає неможливою через сіткові струми. Крім того, у тріоді відносно велика прохідна ємність $C_{а-с}$, яка погіршує роботу підсилювача. Ці недоліки тріода усуваються застосуванням другої (екрануючої) сітки, яку розміщують між анодом та керуючою сіткою. Такі електронні лампи з двома сітками називаються **тетрадами**. Керуючу сітку в тетроді роблять рідкою, щоб запірна напруга була більшою й анодно-сіткові характеристики розміщувались у лівій частині. Друга сітка має бути густою, щоб була якісним екраном для катода та для керуючої сітки від анодного поля. Тому вплив анодної напруги на напруженість електричного поля поблизу катода виявляється слабким, оскільки основне його поле утворюється екрануючою сіткою, на яку подається додатна напруга $U_{с2}$, дещо нижча від анодної.

Частина електронів, пролітаючи між витками екрануючої сітки, досягає анода й утворює анодний струм. Друга частина їх потрапляє на екрануючу сітку й утворює сітковий струм, який має бути по можливості малим.

Послаблення поля між анодом та керуючою сіткою зменшує прохідну ємність між цими електродами $C_{а-с}$ у багато разів, а послаблення анодного поля поблизу катода зменшує вплив анодної напруги на силу анодного струму, тобто збільшує коефіцієнт підсилення,

оскільки вплив потенціалу керуючої сітки на силу анодного струму залишається попереднім. Тому коефіцієнт підсилення та внутрішній опір тетрода значно вищі, ніж у тріода, в той час як крутість однакова.

Суттєвим недоліком тетрода є виникнення потоку електронів вторинної емісії від анода до екрануючої сітки. Електрони, що летять з великою швидкістю до анода, ударяють в нього й вибивають з його поверхні вторинні електрони. Якщо під час роботи лампи напруга екрануючої сітки буде вищою від анодної ($U_{с2} > U_a$), то вторинні електрони притягуватимуться полем цієї сітки, збільшуючи силу струму екрануючої сітки й зменшуючи силу анодного струму, незважаючи на підвищення анодної напруги. Явище зниження сили анодного струму зі зростанням анодної напруги, обумовлене вторинною емісією, називається **динактронним ефектом**. Якщо анодна

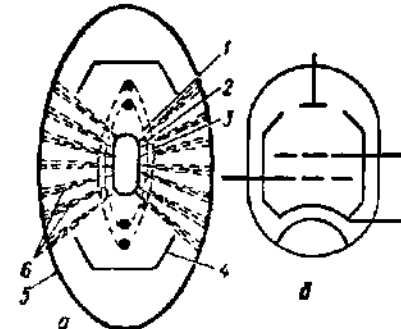


Рис. 124. Схема будови променевого тетрода (а) та його умовне позначення (б).

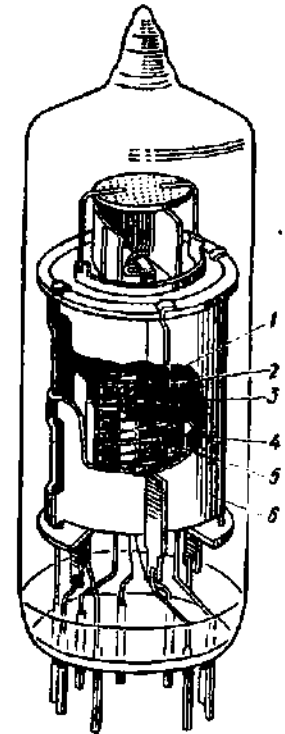


Рис. 125. Будова променевого тетрода 6П1П:

1 — керуюча сітка; 2 — катод; 3 — підігрівник; 4 — екрануючі пластини; 5 — екрануюча сітка; 6 — анод.

напруга перевищує напругу екрануючої сітки, динактронний ефект приписується, вторинні електрони повертаються на анод і сила анодного струму зростає зі збільшенням анодної напруги.

У променевому тетроді (рис. 124) динактронний ефект усувається утворенням між анодом 5 та екрануючою сіткою 3 негативного об'ємного заряду, поле якого гальмує вторинні електрони і повертає їх знову на анод. Катод має плоску форму, керуюча 2 та екрануюча

3 сітки виконані з однаковим кроком намотування. Між екрануючою сіткою 3 та анодом 5 з боків прикріплено дві променеутворювальні пластини 4, які з'єднані з катодом 1 і мають негативний потенціал відносно анода. За такої будови електродів електрони, що летять від катода до анода, формуються в щільні електронні пучки 6, а променеутворювальні пластини перешкоджають електронним променям з боків і концентрують їх у ділянці циліндричної поверхні анода. Концентрація електронних потоків між анодом та екрануючою сіткою утворює негативний об'ємний заряд, значною мірою послаблюючи динаatronний ефект. Будову променевого тетрода наведено на рис. 125.

У п'ятиелектродних лампах (пентодах) для усунення негативного ефекту вторинної емісії між анодом та екрануючою сіткою розміщують ще одну (третю) сітку, яка називається захисною, або антидинаatronною. Захисну сітку в пентодах в'єднують з катодом і вона перебуває під негативним потенціалом відносно анода, внаслідок чого вторинні електрони відштовхуються захисною сіткою і до екрануючої сітки не долітають, тобто усувається динаatronний ефект.

Наявність третьої сітки в пентоді (рис. 126, а) призводить до ще більшого послаблення впливу анодної напруги на лампове поле та на силу анодного струму.

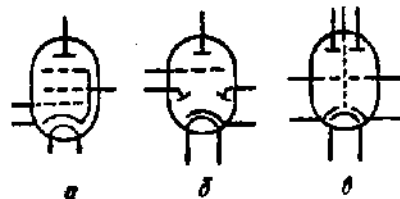


Рис. 126. Умовні позначення ламп:
а — пентода; б — подвійного діод-тріода;
в — подвійного тріода.

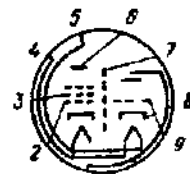
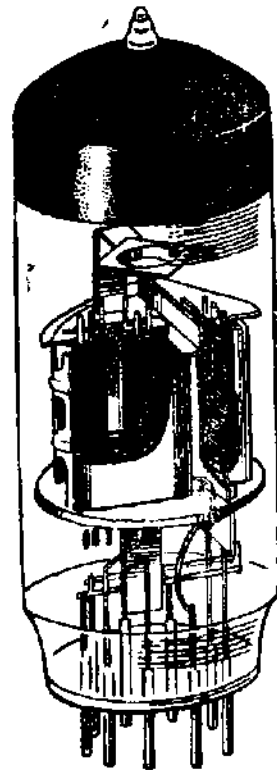


Рис. 127. Будова тріод-пентода 6Ф1П та його цоколітка.

ня монтажу схем застосовують комбіновані та багато-сіткові лампи. До комбінованих належать електронні лампи, у яких в одному балоні знаходиться кілька електронних систем, наприклад подвійний діод-тріод (рис. 126, б), подвійний тріод (рис. 126, в) та ін. На рис. 127 наведено будову тріод-пентода з його цоколіркою.

Багатосітковими називаються електронні лампи, у яких є анод, катод і понад три сітки. У таких ламп кілька електродів можуть виконувати однакові функції, наприклад анодний струм може керуватися двома напругами, кожна з яких подається на свою сітку. Щоб зменшити вплив керуючих сіток, застосовують додаткову екрануючу сітку, розміщену між керуючими.

Електронні лампи типу тетрода з шістьма електродами називаються гексодами, типу пентода з сімома електродами (п'ятьма сітками) — гептодами, з вісьмома електродами — октодами.

§ 93. ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ТРУБКИ. ОСЦИЛОГРАФИ

Електронно-променевою трубкою називається електровакуумний прилад, у якому електронний потік формується в електронний промінь і використовується для перетворення електричних сигналів у світлові.

Скляний балон електронно-променевої трубки має форму колби (рис. 128), у якій утворено високий вакуум. Електронний прожектор,

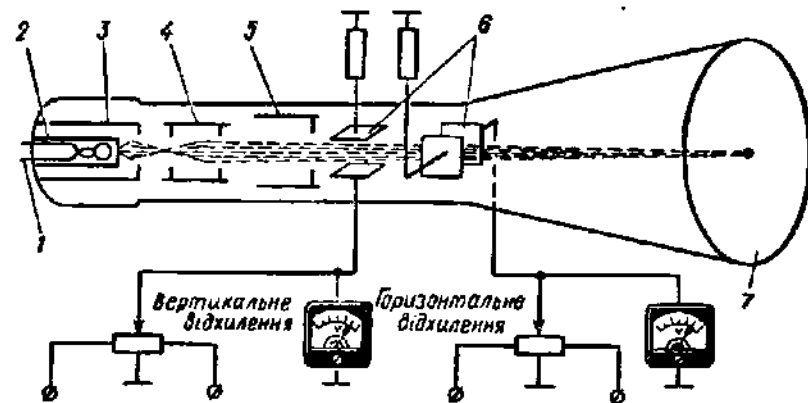


Рис. 128. Схема будови електронно-променевої трубки.

Тому коефіцієнт підсилення μ та внутрішній опір пентода R , набагато вищі, ніж у тетрода.

Для зменшення габаритів електронних пристроїв і для спрощен-

або електронна гармата, складається з підігрівного катода 2, модулятора, або керуючого електрода 3 та анодів 4 і 5, які фокусують електронний промінь на екрані 7. Катод 2 являє собою нікелевий

циліндр, усередині якого розміщено вольфрамовий підігрівник 7. На торцевій частині катода з зовнішнього боку нанесено оксидний шар, що забезпечує одержання електронів в один бік. Катод оточений керуючим електродом (модулятором) 3, який являє собою металевий циліндр з отвором у торці і призначений для регулювання кількості електронів у промені та для початкового його формування. Модулятор має певний від'ємний потенціал відносно катода, і електрони, що вилітають із катода й спрямовуються в бік модулятора, під дією електричного поля між катодом і модулятором змінюють напрямок свого руху, відхиляючись до осі променя.

Зі збільшенням від'ємного потенціалу модулятора частина електронів набуває великого відхилення й не пройде крізь отвір, тобто, змінюючи потенціал модулятора, можна регулювати кількість електронів у промені та яскравість плями на екрані. Пройшовши модулятор, електрони знову можуть відхилитися від осі променя. Для подальшого фокусування променя служать аноди 4 і 5. Обидва вони циліндричні з діафрагмою для обмеження поперечного перерізу променя. У першого анода 4, фокусуємого, додатний потенціал відносно катода становить 200...500 В. Під дією сил електричного поля він стискує потік електронів, утворюючи тонкий електронний промінь. Другий анод 5, прискорювальний, розміщений на певній відстані від першого вздовж осі трубки і перебуває під додатним потенціалом 1000...2000 В відносно катода. Між двома анодами виникає електричне поле, потрапивши в яке електрони відхиляються до осі променя й набувають прискорення у напрямку руху до екрана 7.

Екран електронно-променевої трубки 7 покритий спеціальною сумішшю (люмінофором), який світиться під дією швидко летючих електронів, тобто коли сфокусований промінь потрапляє в яку-небудь точку екрана, ця точка починає світитися. Як люмінофори для екранів електронно-променевих трубок використовують оксиди цинку, берилійового цинку, суміш сульфату цинку з сульфатом кадмію гошо. Цим матеріалам характерна властивість післясвічення, тобто вони продовжують світитися певний час після припинення електронних ударів.

Електронний промінь, потрапляючи на екран, віддає йому енергію, частина якої перетворюється у світлову у вигляді світної плями діаметром менше 1 мм. Певна частина енергії електронного променя передається електронам екрана, обумовлюючи вторинну емісію. Вторинні електрони вловлюються провідним графітовим шаром (аквадагом), який частково покриває внутрішню циліндричну й конічну частини колби і з'єднаний з другим анодом.

Відхильні пластини 6 призначені для переміщення електронного променя на екрані. Перша пара пластин відхиляє електронний промінь у вертикальній площині й називається вертикально

відхильною, а друга пара відхиляє промінь у горизонтальній площині й називається горизонтально відхильною.

Електричне поле, що виникає між відхильними пластинами, діє на електронний промінь, відхиляючи його. Припустимо, що електронний промінь збігається з віссю трубки і світна пляма знаходиться в центрі екрана. Якщо прикласти до вертикальних відхильних пластин сталу напругу, то між ними виникне електричне поле, яке обумовить відхилення променя, і він зустрінеться з екраном в іншій точці, вище або нижче початкової. Під дією електричного поля відхильних пластин електрони й електронний промінь відхиляються в бік пластини з додатним потенціалом. Змінюючи напругу на вертикальних відхильних пластинах і її полярність, можна міняти кут і напрямок зміщення променя, а точка свічення екрана переміщуватиметься по вертикалі. Аналогічно зміна напруги та її полярності на горизонтальних відхильних пластинах обумовлюватиме відхилення променя і свічення екрана по горизонталі.

Електронно-променеві трубки з магнітним керуванням мають у своєму складі катод, модулятор та перший анод такої ж будови й призначення, що й у трубки з електричним керуванням. Другий анод для прискорення руху електронів вздовж осі виконано у вигляді графітового шару на внутрішній поверхні циліндричної й конічної частини колби. Промінь фокусується магнітним полем, збуджуваним постійним струмом спеціальної фокусуємої котушки. Під дією неоднорідного магнітного поля всередині цієї котушки електрони, рухаючись, відхиляються до осі трубки й фокусується на екрані. Фокусування регулюється зміною сили струму фокусуємої котушки. Відхильна система являє собою дві пари відхильних котушок, осі яких розміщені взаємно перпендикулярно. Електронний промінь у магнітному полі відхильних котушок змінює свою траєкторію під дією сил, напрямком яких визначається правилом лівої руки.

За своїм призначенням електронно-променеві трубки можна поділити на три групи: осцилографічні — для дослідження періодичних та аперіодичних процесів; індикаторні — для реєстрації сигналів; приймальні телевізійні (кінескопи) — для одержання зображення на екрані.

Позначення електронно-променевих трубок розшифровується так: перший елемент (цифра) — заокруглений діаметр (діагональ) екрана в сантиметрах; другий елемент (дві літери) — тип трубки (ЛО — осцилографічна трубка, кінескоп з електростатичним відхиленням променя); ЛМ — трубка з електромагнітним відхиленням променя); третій елемент (цифра) — порядковий номер типу приладу; четвертий елемент (літера) — тип екрана (колір свічення, тривалість і колір післясвічення).

Електронно-променевим (електронним) осцилографом називається прилад, призначений для стеження, запису, вимірювань і контролю за періодично змінюваними у часі електричними параметрами (напругою, силою струму тощо). Основною частиною осцилографа є електронно-променева трубка з електростатичним відхиленням променя. Щоб одержати криву досліджуваної напруги u її підводять до вертикально відхильних пластин. До горизонтально відхильних пластин підводять напругу розгортки u_p пилкоподібної форми (рис. 129, а)

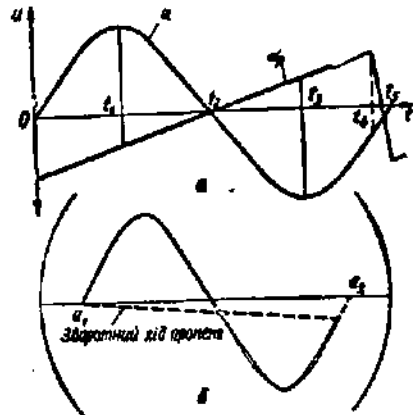


Рис. 129. Криві досліджуваної напруги u та напруги розгортки u_p (а) і зображення кривої напруги на екрані осцилографа (б).

від спеціального генератора, змонтованого всередині осцилографа. Під дією пилкоподібної напруги електронний промінь переміщується горизонтально по екрану і протягом часу $0 - t_1$ він переміститься зліва направо, а протягом часу $t_1 - t_2$ швидко повернеться у вихідне положення, після чого знову рухатиметься зліва направо і т. д. Період пилкоподібної напруги розгортки має бути однаковим з періодом зміни досліджуваної напруги або більшим від нього в ціле число разів. Якщо на вертикально відхильних пластинках напруги немає, то промінь переміщується по екрану у вигляді горизонтальної лінії і за ідеальної пилкоподібної форми він повернувся б із точки a_2 в точку a_1 (рис. 129, б) на екрані. У разі подачі на вертикально відхильні пластини досліджуваної напруги u електронний промінь під впливом електричного поля цих пластин відхилитиметься у вертикальному напрямку на відстань, прямо пропорційну миттєвому значенню досліджуваної напруги.

Отже, за одночасної подачі на відхильні пластини напруги розгортки та досліджуваної напруги електронний промінь накреслить на екрані криву зміни досліджуваної функції, стійкості якої сприяє світлова інерція екрана.

Якщо частоти напруг досліджуваного сигналу й розгортки різні й не кратні одна одній, то зображення переміщуватиметься вздовж екрана і, щоб зупинити його переміщення, потрібно синхронізувати частоти цих напруг.

Дійсні криві пилкоподібної розгорткової напруги відрізняються від ідеальної кривої, і спадна частина кривої не вертикальна, а похила, що обумовлює випадання з графіка певної її частини. Зворот-

ний рух променя з точки a_2 в точку a_1 відбувається протягом часу $t_1 - t_2$, тобто значно швидше, ніж рух променя по прямій. Крім того, зворотний хід променя гасять і на екрані його не видно.

Електронні осцилографи застосовують також для одночасного дослідження двох періодично змінюваних функцій. Для цього використовують або двопроменевий осцилограф, або однопроменевий зі спеціальним електронним комутатором. Цей комутатор по чергову вмикає то одну, то іншу досліджувану функцію, яка діє на електронний промінь електронно-променевої трубки, внаслідок чого на її екрані одночасно висвічуються дві криві досліджуваних функцій.

Контрольні запитання

1. Що таке термоелектронна емісія?
2. Яка електронна лампа називається діодом?
3. Яка будова триелектродної лампи?
4. Що називається крутістю характеристика триода?
5. Поясніть будову променевого тетрода.
6. Яке призначення третьої (антидисторційної) сітки?
7. Як відбувається відхилення електронного променя в електронно-променевій трубці?

Розділ X. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ

§ 94. ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Напівпровідниками називаються матеріали, що займають проміжне положення між провідниками й діелектриками. Особливість металевих провідників полягає у наявності вільних електронів, які є носіями електричних зарядів. У діелектриків вільних електронів немає, тому вони не проводять струм.

На відміну від провідників напівпровідникам характерна не тільки електронна, але й діркова провідність, яка значною мірою залежить від температури, освітленості, стиснення, електричного поля та інших факторів.

Хімічний зв'язок двох сусідніх атомів з утворенням на одній орбіті спільної пари електронів (рис. 130, а) називають ковалентним, або парноелектронним і умовно зображають двома лініями, які з'єднують електрони (рис. 130, б). Наприклад, германій належить до електронів четвертої групи періодичної системи елементів Д. І. Менделєєва і має на вищій орбіті чотири валентні електрони. Кожен атом у кристалі германію утворює ковалентні зв'язки з чотирма сусідніми атомами (рис. 130, в). У разі відсутності домішок і за температури, що наближається до абсолютного нуля, всі валентні електрони атомів у кристалі германію взаємно пов'язані й вільних електронів

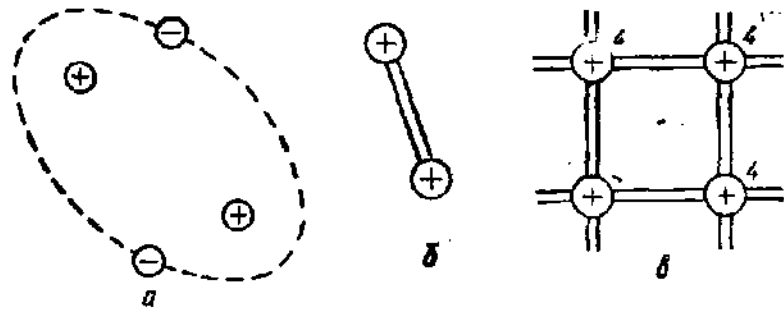


Рис. 130. Кристалічна ґратка напівпровідника:
 а — парноелектронний (ковалентний) зв'язок атомів; б — його схематичне зображення; в — зв'язки у кристалічній ґратці германію.

немає, тому германієві провідність не властива. З підвищенням температури або в процесі опромінення збільшується енергія електронів, що призводить до часткового порушення ковалентних зв'язків і появи вільних електронів. Уже при кімнатній температурі під дією зовнішнього електричного поля вільні електрони переміщуються і в кристалі виникає електричний струм. Електропровідність, обумовлена переміщенням вільних електронів, називається е л е к т р о н н о ю провідністю, або *n*-провідністю.

З появою вільних електронів у ковалентних зв'язках утворюється вільне, не заповнене електроном (вакантне) місце — електронна дірка. Оскільки дірка виникла в місці відриву електрона від атома, то в ділянці її утворення виникає надлишковий позитивний заряд. За наявності дірки будь-який з електронів сусідніх зв'язків може зайняти місце дірки й нормальний ковалентний зв'язок у цьому місці відновиться, але буде порушений у тому місці, звідки вийшов електрон. Нову дірку може зайняти ще якийсь електрон і т. д. Схему утворення й заповнення дірки умовно показано на рис. 131. У похило встановленій підставці є чотири отвори (дірки), в яких розміщені чотири кульки (електрони). Якщо кулька 1 зміститься праворуч, то вона звільнить отвір (дірку) і впаде з підставки, а в отвір, який займала ця кулька, переміститься кулька 2. Вільний отвір (дірку) кульки 2 займе кулька 3, а отвір кульки 3 — кулька 4.

Рис. 131. Схема утворення й заповнення дірок у кристалі германію.

іншого електричного поля дірки переміщуються в напрямку його сил, тобто в напрямку, протилежному переміщенню електронів. Провідність, що виникає внаслідок переміщення дірок, називається д і р к о в о ю провідністю, або *p*-провідністю.

Отже, в разі електронної провідності один вільний електрон проходить весь шлях у кристалі, а в разі діркової провідності велика кількість електронів по чергово замінюють один одного у ковалентних зв'язках і кожен з них проходить свій відтинок шляху.

У кристалі чистого напівпровідника з порушенням ковалентних зв'язків виникає однакова кількість вільних електронів і дірок. Одночасно з цим відбувається «воротний процес» — рекомбінація, під час якої вільні електрони заповнюють дірки, утворюючи нормальні ковалентні зв'язки. За певної температури кількість вільних електронів і дірок в одиниці об'єму напівпровідника в середньому залишається сталою. З підвищенням температури кількість вільних електронів і дірок значно зростає і провідність германію так само збільшується, тобто напівпровідникам характерний негативний температурний коефіцієнт опору. Електропровідність напівпровідника за відсутності в ньому домішок називається його власною електропровідністю.

Властивості напівпровідників значною мірою міняються за наявності в ньому мізерної кількості домішок. Вводячи атоми інших елементів, у кристалі напівпровідника можна одержати перевагу вільних електронів порівняно з дірками або, навпаки, перевагу дірок над вільними електронами. Наприклад, у разі заміщення у кристалічній ґратці атома германію атомом п'ятивалентної речовини (миш'яку, сурми, фосфору) чотири електрони цієї речовини утворять заповнені зв'язки з сусідніми атомами германію, а п'ятий електрон буде вільним (рис. 132, а), тому така домішка збільшить електронну провідність (*n*-провідність) і називатиметься д о н о р н о ю. У разі заміщення атома германію атомом тривалентної речовини (індію, галію, алюмінію) його електрони вступають у ковалентний зв'язок із трьома сусідніми атомами германію, а зв'язків із четвертим атомом германію не буде, оскільки в індію немає четвертого електрона (рис. 132, б).

Відновлення всіх ковалентних зв'язків можливе, якщо четвертий електрон, якого бракує, буде одержаний від найближчого атома германію. Але при цьому на місці електрона, що залишив атом германію, з'явиться дірка, яка може бути заповнена електроном із сусіднього атома германію. Послідовне заповнення вільного зв'язку еквівалентне руху дірок. Домішки з меншою кількістю валентних електронів у атомі порівняно з атомом даного напівпровідника обумовлюють переважання діркової провідності й називаються а к ц е п т о р н и м и.

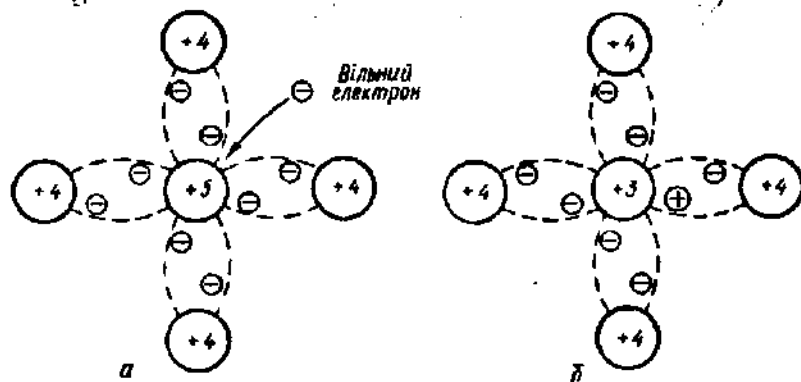


Рис. 132. Схема зв'язку домішок з германієм: а — п'ятивалентного (донорного); б — тривалентного (акцепторного).

Носії заряду, що визначають собою вид провідності у домішковому напівпровідникові, називаються основними (дірки в p -напівпровіднику та електрони в n -напівпровіднику), а носії заряду протилежного знаку — неосновними.

§ 95. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

Напівпровідниковий діод (вентиль) являє собою контактне з'єднання двох напівпровідників, один з яких із електронною провідністю (n -типу), а другий — з дірковою (p -типу, рис. 133, а). Через велику концентрацію в напівпровідникові n -типу електрони проникатимуть із першого напівпровідника у другий. Аналогічно відбуватиметься дифузія дірок із другого p -типу напівпровідника в перший n -типу. У тонкому суміжному шарі напівпровідника n -типу виникає позитивний заряд, а в суміжному шарі напівпровідника p -типу — негативний. Між цими шарами утворюється різниця потенціалів (потенціальний бар'єр) та електричне поле напруженістю E_n , яка перешкоджає дифузії електронів і дірок з одного напівпровідника в інший. Отже, на межі двох напівпровідників виникає тонкий шар, який збіднений носіями зарядів (електронів та дірок) і має великий опір. Цей шар називається запірним або $p-n$ -переходом.

Внаслідок теплового руху в електричне поле $p-n$ -переходу потрапляють неосновні носії зарядів (електрони з p -ділянки та дірки з n -ділянки). Рух неосновних носіїв зарядів під дією сил поля $p-n$ -переходу спрямований назустріч дифузійному струмові основних носіїв і називається дрейфовим, або тепловим струмом, який значною мірою залежить від температури. За відсутності зовнішнього

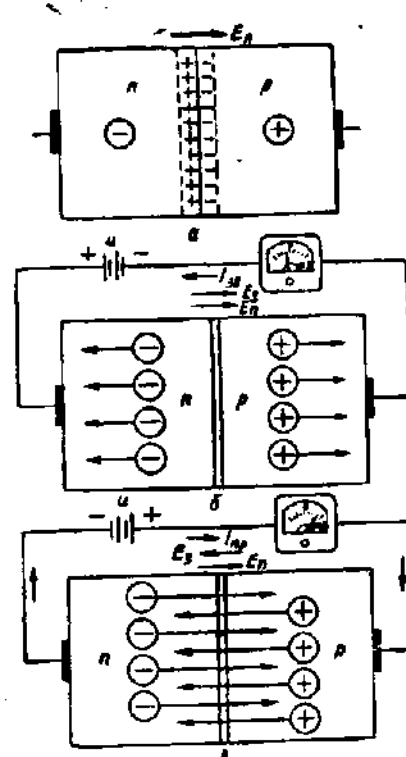
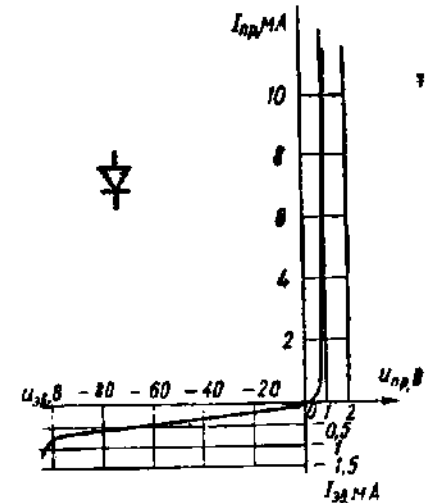


Рис. 133. Напівпровідниковий вентиль: а — схема будови; б — схема зв'язання у зворотному напрямку; в — схема зв'язання у прямому напрямку

Рис. 134. Вольт-амперна характеристика германієвого вентиля та його умовне позначення.



електричного поля дрейфовий струм зрівноважується дифузійним і сумарний струм через $p-n$ -перехід дорівнює нулеві.

З'єднавши позитивний затискач джерела живлення з металевим електродом напівпровідника n -типу, а негативний затискач — з електродом напівпровідника p -типу, одержимо зовнішнє електричне поле напруженістю E_n , яке спрямовується узгоджено з полем $p-n$ -переходу напруженістю E_p і підсилює його (рис. 133, б). Таке поле ще більше перешкоджатиме проходженню основних носіїв зарядів через запірний шар, і через діод пройде малий зворотний струм силою I_{zp} , обумовлений неосновними носіями заряду. Сила зворотного струму діода значною мірою залежить від температури, збільшуючись із її підвищенням.

У разі зміни полярності джерела живлення (рис. 133, в) зовнішнє електричне поле напруженістю E_n буде спрямоване назустріч полю $p-n$ -переходу напруженістю E_p і під дією цього поля електрони й дірки почнуть рухатися назустріч одне одному і кількість основних носіїв заряду в перехідному шарі зростає, зменшуючи потенціальний бар'єр і опір перехідного шару. Отже, в колі встановлюється прямий струм,

сила якого $I_{\text{пр}}$ буде значною навіть за відносно невисокої напруги джерела живлення U .

На рис. 134 наведено вольт-амперну характеристику германієвого діода та його умовне позначення. Для більшої наочності пряме відгалуження (права частина графіка) та зворотне відгалуження (ліва частина графіка) характеристики зображені в різних масштабах. Характеристика показує, що в разі невеликої прямої напруги на затискачах діода ($U_{\text{пр}} = 1 \text{ В}$) у його колі протікає струм відносно великої сили, а в разі значних зворотних напруг $U_{\text{зв}}$ сила струму $I_{\text{зв}}$ зовсім низька.

Отже, напівпровідниковому діодові характерна одностороння провідність, тобто такий діод є електричним вентиляем.

Промисловість випускає германієві, кремнієві, селенові та міднозакисні електричні вентиля. Германієві та кремнієві вентиля виготовляють двох типів: точкові та площинні. У точковому германієвому діоді (рис. 135, а) розміщено германієвий кристал 5 з електронною провідністю, в який вістрям входить контактний пружинний вивід анода 3. Під контактним вістрям внаслідок спеціальної термічної обробки утворюється ділянка з дірковою провідністю. У площинному германієвому діоді (рис. 135, б) на германієву пластину 5 з електронною провідністю накладається таблетка з індію, яка в процесі виготовлення діода нагрівається до 500°C і плавиться так, що її атоми дифузують у германій, утворюючи ділянку з дірковою провідністю. На межі двох ділянок (з електронною та дірковою провідністю) з'являється запирний $p-n$ -перехід. У точковому й площинному діодах германій 5 приємом 4 закріплено на кристалотримачі 6, до якого приварено нижній вивід катода 7. Вивід анода 3 також приємом 4 закріплено на ділянці з дірковою провідністю й виводиться назовні у верхній частині діода. Металевий корпус 2 зварений із кристалотримачем 6 та скляним ізолятором 1.

Кремнієві діоди відрізняються від германієвих не тільки матеріалом напівпровідника, але й деякими перевагами, а саме: вищою граничною температурою, значно нижчою силою зворотного струму, вищою пробивною напругою. Проте опір кремнієвого вентиля в прямому напрямку значно більший, ніж германієвого.

Селеновий вентилю являє собою алюмінієвий диск, покритий з одного боку шаром кристалічного селену, якому характерна діркова провідність. Одним електродом буде шар кристалічного селену, а другим — нанесений на селен шар сплаву з кадмію й олова, під час дифузії з якого атомів кадмію в селен утворюється шар з електронною провідністю. У селенових вентилях значно менші зворотні напруги (до 60 В) та густини струму ($0,1 \dots 0,2 \text{ А/см}^2$), ніж у германієвих та кремнієвих, тому їх габарити й маса значно більші. Проте характеристики селенових вентилях стабільніші, що дає змогу з'єднувати їх послідовно й паралельно для збільшення зворотних напруг і пря-

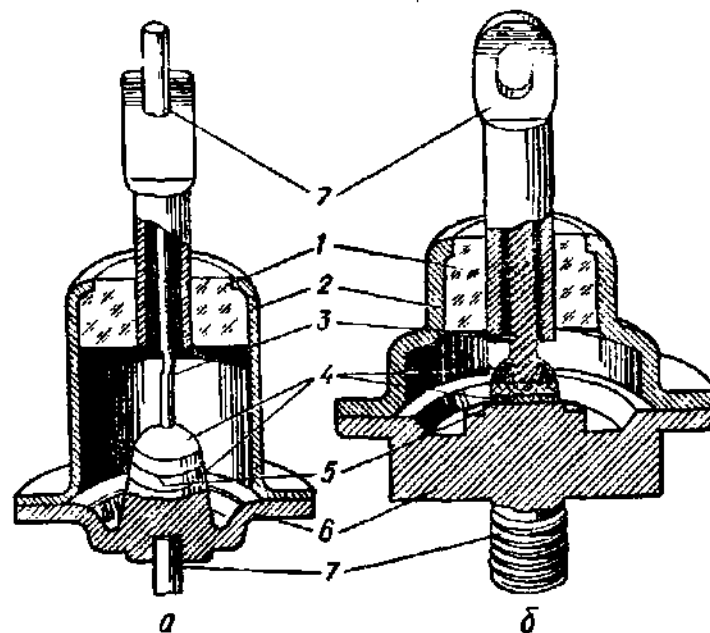


Рис. 135. Конструкції германієвих діодів:
а — точкового; б — площинного.

мих струмів. Крім того, селенові вентиля мають властивість самовідновлюватися, яка полягає в тому, що коли через пробиту шайбу пропустити струм великої сили, то селен нагріватиметься й плавитиметься, закриваючи місце пробою й відновлюючи вентиляльну властивість діода.

Міднозакисний вентилю являє собою мідний диск із шаром оксиду міді (I), до якого прилягає свинцевий диск із латунним радіатором великого діаметра. Шар оксиду міді (I) утворюється під час термічної обробки міді в атмосфері кисню. Зовнішній шар оксиду міді (I), одержаний за кисневого надлишку, має діркову провідність, а шар оксиду, одержаний за кисневої недостатності, — електронною провідністю. Між цими двома шарами виникає $p-n$ -перехід.

У міднозакисних вентилях низькі зворотні напруги (10 В) та густини струму ($0,1 \text{ А/см}^2$) і в перетворювальних пристроях не використовуються. Їх застосування обмежене вимірювальними приладами зі стабільними характеристиками.

Багатофункціональним приладом (для підсилення, генерації, перемикання тощо) для роботи переважно в ділянці надвисоких частот служить т у н е л ь н и й діод. Він може працювати й на нижчих

частотах, ніж міднозакисний вентиль, проте його ефективність у ньому разі знижується.

Виготовляючи тунельний діод, в p -ділянку і в n -ділянку вводять легуючі домішки в дуже великій концентрації (на два-три порядки вище, ніж у звичайних діодах). Внаслідок цього ширина $p-n$ -переходу надзвичайно мала й усередині нього виникає електричне поле високої напруженості.

На рис. 136, а зображено вольт-амперну характеристику тунельного діода, основними параметрами якого є: пікова сила струму I_1 , мінімальна сила струму западини I_2 , пікова напруга U_1 , напруга западини U_2 , напруга розчину U_3 — пряма напруга на другому висхідному відгалуженні при силі струму, що дорівнює піковій I_1 .

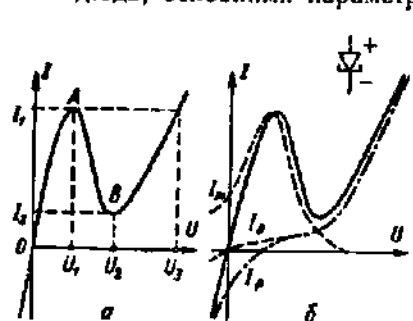


Рис. 136. Вольт-амперна характеристика та умовне позначення тунельного діода:

а — характеристика; б — криві зміни сил струму.

становить кілька десятків мілівольт, а потім починає зменшуватися (ділянка AB) до мінімального значення I_2 при напрузі U_2 , яка становить кілька сотень мілівольт. Далі сила прямого струму знову починає збільшуватися зі зростанням напруги. Силу струму, що протікає через тунельний діод, можна подати сумою сил двох струмів: $I = I_T + I_D$, де $I_T = I_n - I_p$; $I_D = I_{диф} - I_{др}$; I_T — сила тунельного струму; I_n — сила струму, обумовленого тунельним переходом електронів із зони провідності n -ділянки у валентну зону p -ділянки; I_p — сила струму, обумовленого тунельним переходом електронів з валентної зони p -ділянки в зону провідності n -ділянки; I_D — сила струму звичайного діода; $I_{диф}$ — сила дифузійного струму основних носіїв обох ділянок через $p-n$ -перехід; $I_{др}$ — сила дрейфового струму неосновних носіїв обох ділянок через $p-n$ -перехід.

Виникнення спадної ділянки вольт-амперної характеристики (ділянка AB) тунельного діода можна пояснити таким чином. З підвищенням напруги збільшується сила тунельного струму, але разом з тим зменшується напруженість електричного поля в $p-n$ -переході. За певного значення прямої напруги U_3 (рис. 136, б) напруже-

ність електричного поля в $p-n$ -переході різко знижується і тунельний струм припиняється, а $p-n$ -перехід набуває властивостей звичайного діода.

§ 96. БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ

Біполярним транзистором або просто транзистором називається напівпровідниковий прилад з двома $p-n$ -переходами, який призначений для підсилення й генерування електричних коливань і являє собою кремнієву пластину, що складається з трьох ділянок. Дві крайні ділянки завжди мають однаковий тип провідності, а середня — протилежний. Транзистори, у яких крайні ділянки мають електронну провідність, а середня — діркову, називаються транзисторами $n-p-n$ -типу (рис. 137, а); транзистори, у яких крайні ділянки мають діркову, а середня — електронну провідність, називаються транзисторами $p-n-p$ -типу (рис. 137, б).

Фізичні процеси, що відбуваються в транзисторах обох типів, аналогічні; різниця між ними полягає в тому, що полярності ввімкнення джерел живлення їх протилежні, а також у тому, що якщо у транзисторі $n-p-n$ -типу електричний струм утворюється в основному електронами, то у транзисторі $p-n-p$ -типу — дірками. Суміжні ділянки, відокремлені одна від одної $p-n$ -переходами, називаються емітером (Е), базою (Б) та колектором (К).

Емітер являє собою ділянку, яка випускає (емітує) носії електричних зарядів у транзисторі $n-p-n$ -типу та дірки — у транзисторі $p-n-p$ -типу; колектор — ділянка, яка збирає носії зарядів; база — середня ділянка, основа.

В умовах роботи транзистора до лівого $p-n$ -переходу прикладається напруга емітер — база $U_{е-б}$ у прямому напрямку, а до правого $p-n$ -переходу — напруга база — колектор $U_{б-к}$ у зворотному напрямку. Під дією електричного поля велика частина носіїв зарядів з лівої ділянки (емітера), долаючи $p-n$ -перехід, переходить у дуже вузьку середню ділянку (базу). Далі велика частина носіїв зарядів продовжує рухатися до другого переходу і, наближаючись до нього, потрапляє в електричне поле, утворене зовнішнім джерелом $U_{б-к}$. Під впливом цього поля носії зарядів втягуються в праву ділянку (колектор), збільшуючи силу струму в колі батареї $U_{б-к}$. Якщо збільшити напругу $U_{е-б}$, то зростає кількість носіїв зарядів, що перейшли з емітера в базу, тобто збільшиться сила струму емітера на $\Delta I_{е-б}$. При цьому також зростає сила струму колектора $\Delta I_{б-к}$.

У базі незначна частина носіїв зарядів, що перейшли з емітера, рекомбінує з вільними носіями зарядів протилежної полярності, вібуття яких поповнюється новими носіями зарядів із зовнішнього кола, які утворюють базовий струм силою $I_б$. Отже, сила колекторно-

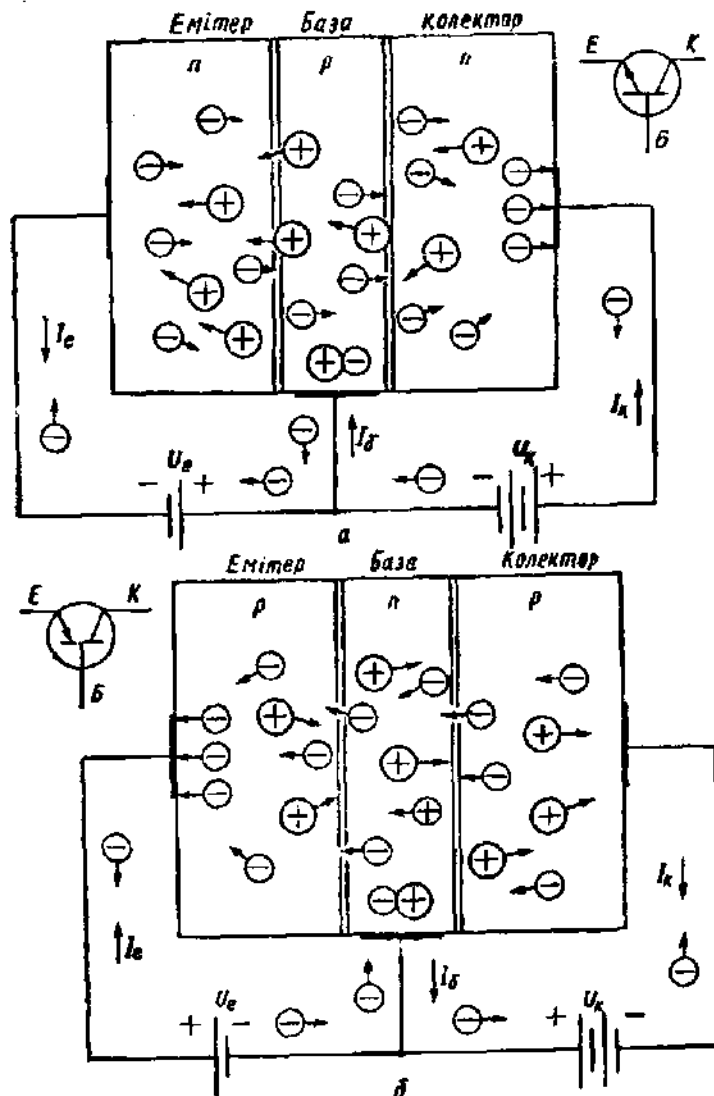


Рис. 137. Принцип роботи та умовне позначення транзистора: а — $n-p-n$ -типу; б — $p-n-p$ -типу.

го струму $I_n = I_c - I_b$ буде дещо меншою від сили емітерного струму. Відношення $\alpha = \Delta I_n / \Delta I_c$ при $U_{к-б} = \text{const}$ називається коефіцієнтом підсилення за силою струму і становить $0,9 \dots 0,995$.

Якщо коло емітер — база розімкнене і сила струму в ньому дорівнює нулеві ($I_e = 0$), а між колектором і базою прикладена напруга $U_{к-б}$, то в колі колектора протікатиме незначної сили зворотний (тепловий) струм $I_{к,зв}$, обумовлений неосновними носіями зарядів. Сила цього струму значною мірою залежить від температури і є одним із параметрів транзистора (чим менша сила струму, тим кращі якості у транзистора).

Оскільки емітерний $p-n$ -перехід перебуває під прямою напругою, то він має малий опір. На колекторний $p-n$ -перехід діє зворотна напруга і він має великий опір. Тому напруга, що прикладається до емітера, дуже мала (десяті частки вольт), а напруга, що подається на колектор, може бути досить великою (до кількох десятків вольт). Зміна сили струму в колі емітера, обумовлена малою напругою U_e , створює приблизно таку ж зміну сили струму в колі колектора, де діє значно вища напруга U_k , внаслідок чого транзистор збільшує потужність.

Для роботи транзистора як підсилювача електричних коливань вхідну змінну напругу $U_{вх}$ (сигнал, що підлягає підсиленню) подають послідовно з джерелом постійної напруги зміщення $U_{зв}$ між емітером і базою, а вихідну напругу $U_{вих}$ (підсилений сигнал) знімають з навантажувального резистора R_k .

Можливі три схеми приєднання транзисторів $n-p-n$ -типу (рис. 138, а) та $p-n-p$ -типу (рис. 138, б): зі спільною базою (СБ), спільним емітером (СЕ) та спільним колектором (СК). Назва схеми показує, який електрод транзистора є спільним для вхідного та вихідного кола. Схеми приєднання транзисторів відрізняються своїми властивостями, але принцип підсилення коливань залишається одним.

У схемі зі спільною базою позитивний приріст напруги на вході $\Delta U_{вх}$ обумовлює збільшення сили емітерного струму I_e , що призводить до зростання сили колекторного струму I_k та напруги виходу $\Delta U_{вих}$, причому $\Delta U_{вих} \gg \Delta U_{вх}$. У схемі з СБ джерело вхідної напруги введено в коло емітер — база, а навантаження та джерело живлення — в коло колектор — база. Вхідний опір схеми з СБ малий (кілька омів або десятків омів), оскільки емітерний перехід зв'язаний у прямому напрямку. Вихідний опір схеми, навпаки, великий (сотні кілоомів), бо колекторний перехід зв'язано у зворотному напрямку. Малий вхідний опір схеми з СБ є істотним недоліком, який обмежує її застосування у підсилювачах. Через джерело вхідного сигналу в цій схемі протікає весь емітерний струм і підсилення за силою струму не відбувається (коефіцієнт підсилення за силою стру-

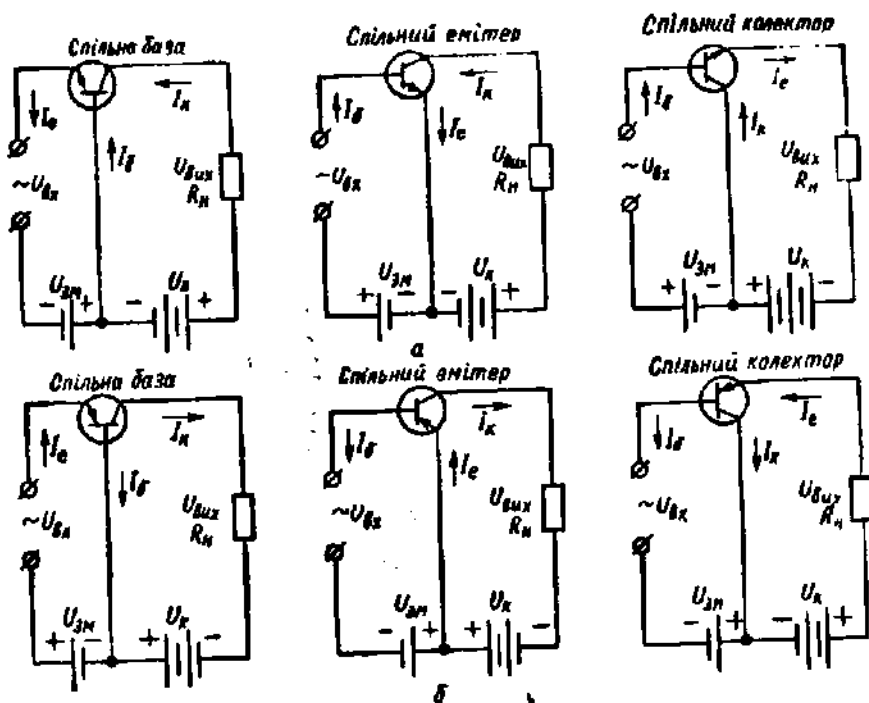


Рис. 138. Схеми приєднання транзисторів $n-p-n$ -типу (а) та $p-n-p$ -типу (б) зі спільною базою, спільним емітером та спільним колектором.

му $\alpha < 1$). Підсилення за напругою й потужністю в цій схемі може досягти кількох сот.

У схемі зі спільним емітером джерело вхідної напруги введено в коло емітер — база, а опір навантаження R_n та джерело живлення — в коло емітер — колектор, тому емітер — база є спільним електродом для вхідного й вихідного кола. Вхідний опір схеми з СЕ більший, ніж у схемі з СБ, бо вхідним струмом у цій схемі є базовий струм, сила якого набагато менша від сили емітерного й колекторного струму. Цей опір становить сотні омів. Вихідний опір схеми з СЕ великий і може доходити до ста кілоомів. Коефіцієнт підсилення за силою струму β в цій схемі є відношенням приросту сили колекторного струму ΔI_k до приросту сили базового струму ΔI_b за постійної напруги на колекторі, тобто $\beta = \Delta I_k / \Delta I_b$ при $U_k = \text{const}$ і для різних транзисторів може мати значення $\beta = 10 \dots 200$. Ураховуючи рівності $I_e = I_k + I_b$ та $\alpha = \Delta I_k / \Delta I_e$, дістанемо

$$\beta = \Delta I_k / (\Delta I_e - \Delta I_b) = (\Delta I_k / \Delta I_e) / (1 - \Delta I_k / \Delta I_e) = \alpha / (1 - \alpha).$$

Коефіцієнт підсилення за напругою k_u для схеми з СЕ такий, як і для схеми з СБ. Коефіцієнт підсилення за потужністю $k_p = \beta k_u$ в багато разів більший, ніж у схемі з СБ.

У схемі зі спільним емітером з підсиленням вхідної напруги відбувається поворот фази вихідної напруги на півперіоду (на 180°): додатний приріст вхідної напруги обумовлює від'ємний приріст вихідної і навпаки.

У схемі зі спільним колектором джерело вхідної напруги вводиться в коло бази, а джерело живлення та опір навантаження — в коло емітера. Вхідним струмом є базовий струм, а вихідним — емітерний. Коефіцієнт підсилення за силою струму для цієї схеми

$$k_i = \Delta I_e / \Delta I_b = \Delta I_e / (\Delta I_e - \Delta I_k) = 1 / (1 - \alpha).$$

Вхідний опір схеми з СК великий (десятки кілоомів), а вихідний — малий (до $1 \dots 2$ кОм). Коефіцієнт підсилення за напругою $k_u = 0,9 \dots 0,95$, тобто наближається до одиниці; цю схему часто називають емітерним повторювачем. Схему з СК використовують для узгодження окремих каскадів підсилення — джерела сигналу або навантаження з підсилювачем.

Характеристиками транзисторів називаються залежності між силами струмів і напругами у вхідному й вихідному колах. У різних схемах приєднання транзистора вхідні й вихідні кола різні, отже, й характеристики являють собою залежності різних параметрів.

Так, для схеми зі спільним емітером (СЕ) вхідним колом є базове коло і вхідна характеристика являє собою залежність сили базового струму від напруги емітер — база за сталої напруги між емітером і колектором: $I_b = f(U_{e-b})$ при $U_{e-k} = \text{const}$. Вихідним колом для цієї схеми є коло колектора і вихідною характеристикою буде залежність сили колекторного струму від напруги емітер — колектор за незмінної сили базового струму: $I_k = f(U_{e-k})$ при $I_b = \text{const}$. На рис. 139 показано приблизний вигляд вхідних і вихідних характеристик транзистора $p-n-p$ -типу. За малих значень напруги між емітером і базою (U_{e-b}) сила базового струму зростає повільно через великий опір $p-n$ -переходу, який зі збільшенням сили струму зменшується. Зі збільшенням колекторної напруги U_{e-k} вхідні характеристики зміщуються праворуч, тобто зі збільшенням U_{e-k} потрібно збільшити напругу, для того щоб сила базового струму залишалася незмінною. Вихідні характеристики показують, що в робочій ділянці напруга U_{e-k} незначною мірою впливає на силу колекторного струму I_k , оскільки вона залежить переважно від кількості дірок, що інжектуються в базу, тобто від сили емітерного струму.

Біполярні транзистори виготовляють з германію та кремнію. Як приклад, розглянемо будову площинного германієвого транзистора $p-n-p$ -типу (рис. 140). Базою служить пластина 3 з кристалічного германію з електронною провідністю. З двох боків у пластину

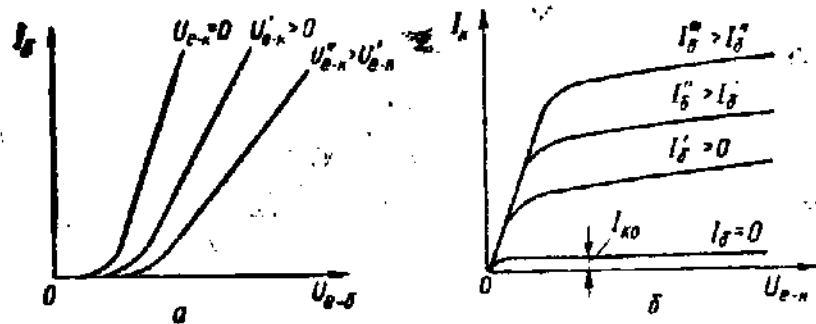


Рис. 139. Статичні характеристики транзистора $p-n-p$ -типу, приєднаного за схемою зі спільним емітером:
а — вхідні; б — вихідні

вплавлені індієві електроди — емітер 6 і колектор 8. Під час плавлення індію між кожним із цих електродів і германієвою пластинкою (базою) утворюються ділянки з дірковою провідністю та емітерний 7 і колекторний 2 $p-n$ -переходи. Колектор 8 закріплюється на кристалотримачі 1, від якого назовні проходить колекторний вивід 9. Виводи емітера 5 та бази 4 ізолювані від корпусу скляними прохідними ізоляторами. Транзистор розміщують у металевому корпусі.

Рис. 140. Схема будови площинного германієвого транзистора $p-n-p$ -типу.

спрощеність схеми й відсутність споживання потужності для розігрівання катода; велика механічна міцність і довговічність; постійна готовність до роботи; малі габарити й маса; низька напруга живлення та високий ККД.

До недоліків транзисторів належать залежність режиму роботи від температури навколишнього середовища; невелика вихідна потужність; чутливість до перевантажень; розкид параметрів, внаслідок чого окремі транзистори одного типу значно відрізняються між собою за своїми параметрами; значна відмінність між вхідними та вихідними опорами.

§ 97. ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ

У польових транзисторах струм створюють основні носії зарядів під дією поздовжнього електричного поля, а керування струмом здійснюється поперечним електричним полем, яке утворюється напругою, прикладеною до керуючого електрода.

Потік основних носіїв заряду переміщується в каналі, який являє собою напівпровідник n - або p -типу. Керування потоком основних носіїв здійснюється зміною поперечного перерізу каналу від дії електричного поля керуючого електрода.

У польових транзисторів три виводи: витік (В), по якому в канал протікають основні носії; стік (С), через який вони витікають із каналу; затвор (З), який регулює поперечний переріз каналу. Виводи В, С, З відповідають (у порядку їх перерахування) катоду, аноду та сітці електровакuumного триода або емітеру, колектору та базі звичайного біполярного транзистора.

За своїми конструктивними особливостями польові транзистори можна поділити на дві групи: з $p-n$ -переходами (каналні, або уніполярні) та з ізолюваним затвором, або МДН-транзистори.

На рис. 141, а зображено схему будови польового транзистора з $p-n$ -переходами та схему його приєднання. Тонкий шар напівпро-

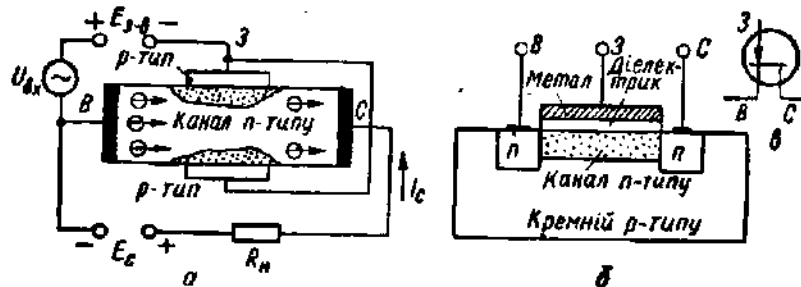


Рис. 141. Схеми будови польового транзистора:
а — з $p-n$ -переходами; б — з ізолюваним затвором; ε — позначення транзистора на схемі

відника n -типу (або p -типу), обмежений з двох боків $p-n$ -переходами, називається каналом. Канал може мати електропровідність як n -типу, так і p -типу, відмінність між якими полягає в полярності напруг живильних джерел. У вхідне коло приєднане джерело зворотного зміщення $E_{c-ε}$ на $p-n$ -переході між затвором і каналом та джерело змінної напруги сигналу $E_{g-ε}$, яку потрібно підсилити. Вихідне коло складається з джерела постійної напруги та опору навантаження R_n . Якщо напруга $E_{c-ε}$ та опір навантаження R_n незмінювані, то сила струму у зовнішньому колі залежатиме від опору каналу.

З підвищенням напруги зворотного зміщення $E_{c-ε}$ збільшується товщина $p-n$ -переходу між затвором та каналом і зменшується струмопровідний переріз каналу, внаслідок чого зростає опір між витоком та стоком і зменшується сила струму I_c . У разі великих зворотних напруг на затворі переріз каналу дорівнюватиме нулеві і струм через нього не протікатиме. Такий режим називається режи-

мом відсікання. Зменшення зворотної напруги на затворі призводить до збільшення струмопровідного перерізу каналу, внаслідок чого його опір знижується і сила транзисторного струму зростає. Якщо на вхід транзистора подається напруга $U_{вх}$, яку потрібно підсилити, то у вихідному колі змінюватиметься сила струму, який, протікаючи через опір навантаження R_n , створює на ньому спад напруги, яка змінюється за законом зміни вхідної напруги $U_{вх}$. Цей ефект буде тим виразніший, чим більший питомий опір матеріалу напівпровідника, тому польові транзистори виготовляють із високоомного матеріалу.

Схему будови польового транзистора з ізолюваним затвором (МДН-транзистора) наведено на рис. 141, б. Цей транзистор має структуру метал — діелектрик — напівпровідник і може бути двох типів: з індукованим та з вбудованим каналами.

Основою польового транзистора з вбудованим каналом служить пластинка монокристалічного кремнію p -типу. Зони витоку й стоку являють собою ділянки кремнію, дуже леговані домішкою n -типу. Затвором служить металева пластинка, ізолювана від напівпровідника шаром діелектрика. Між витоком і стоком утворюється вузька смуга кремнію p -типу (канал). У транзисторі з індукованим каналом металевий затвор і напівпровідниковий матеріал n -типу, розділений діелектриком, утворюють плоский конденсатор. Якщо на металевий затвор подати додатну напругу, то позитивний заряд затвора індукуватиме відповідний негативний заряд у напівпровідниковій ділянці каналу. У транзисторі з вбудованим каналом між витоком і стоком методом дифузії утворюють канал із провідністю n -типу, а основу — з провідністю p -типу.

Коли на затворі напруги немає, сила струму між витоком і стоком обумовлюється опором n -каналу. За від'ємної напруги на затворі концентрація носіїв заряду в каналі зменшується і в ньому з'являється збіднений шар, внаслідок чого опір між стоком і витоком збільшується і сила струму в транзисторі знижується. У разі додатної напруги на затворі сила стокового струму збільшується, тому що електрони втягуються в канал із пластинки (основи), тобто канал збагачується носіями заряду.

Отже, польовий транзистор з ізолюваним затвором може працювати з від'ємною і з додатною напругою на затворі, тобто зі збідненим і збагаченим каналом, у той час як транзистори з $p-n$ -переходами можуть працювати лише з від'ємною напругою на затворі, тобто зі збідненим каналом.

На рис. 142, а зображено приблизний вигляд сім'ї вихідних (стокових) вольт-амперних характеристик польового транзистора з ізолюваним затвором $I_c = f(U_c)$ при $U_{з-в} = \text{const}$. Якщо напруга між витоком і затвором $U_{з-в} = 0$, то підвищення напруги U_c на стоку обумовлюватиме зростання сили стокового струму I_c , майже прямо пропорційне зростанню напруги U_c . Проте зі збільшенням

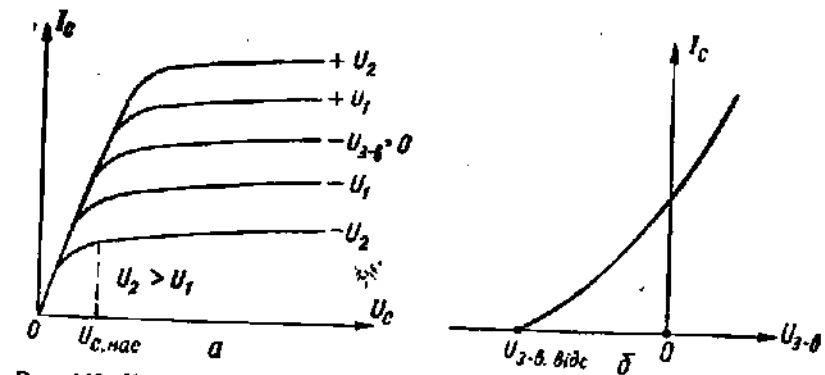


Рис. 142. Характеристики польового транзистора з ізолюваним затвором: а — вихідні (стокові); б — стокозатворна.

I_c зростає спад напруги в каналі й підвищується зворотна напруга $p-n$ -переходів, що сповільнює зростання сили струму I_c . Зрештою канал звужується так, що подальше підвищення напруги U_c не призводить до збільшення сили струму I_c і транзистор входить у режим насичення, а напруга U_c , за якої відбувається насичення, називається напругою насичення $U_{с,нас}$. Ця напруга буде різною залежно від напруги $U_{з-в}$. Якщо зняти залежність сили струму I_c від напруги U_c для різних напруг $U_{з-в}$, то дістанемо сім'ю вихідних характеристик польового транзистора з ізолюваним затвором.

Залежність $I_c = f(U_{з-в})$ при $U_c = \text{const}$ називається стокозатворною характеристикою (рис. 142, б). Для транзисторів з $p-n$ -переходами права частина стокозатворної характеристики відсутня, оскільки транзистори цього типу з додатною напругою на затворі працювати не можуть.

У розглянутих польових транзисторів канал з провідністю n -типу, а основа (пластина) — з провідністю p -типу. Можливе й інше поєднання: канал з p -провідністю, а основа — з n -провідністю. У цьому разі полярність напруги на затворі матиме протилежний знак.

Перевагою польових транзисторів є те, що асортимент напівпровідникових матеріалів для їх виготовлення значно ширший, ніж для виготовлення біполярних транзисторів. Польові транзистори працюють лише з основними носіями заряду, тому можливе створення приладів, стійких до температурних і радіоактивних впливів. Крім того, на відміну від біполярних у польових транзисторах виключається виникнення рекомбінаційного шуму.

Польові транзистори мають дуже високий вхідний опір, який у транзисторах із $p-n$ -переходами становить $10^8 \dots 10^9$ Ом, а в транзисторах з ізолюваним затвором — $10^{13} \dots 10^{15}$ Ом. У транзисторах із $p-n$ -переходами електронно-дірковий перехід між затвором

і витокм приєднаний у зворотному напрямку, а в транзисторах в ізолюванім затвором вхідний опір обумовлюється дуже великим опором витікання діелектрика.

Розглянемо основні параметри польових транзисторів.

Крутість характеристики $S = \Delta I_c / \Delta U_{з-п}$ при $U_c = \text{const}$. Цей параметр характеризує ефективність керуючої дії затвора.

Напруга відсікання $U_{з-п, відс}$ обернено пропорційна напрузі на затворі, за якої сила струму I_c дорівнює нулеві.

Вхідний опір між затвором і витокм $R_{вх} = \Delta U_{з-п} / \Delta I_c$ визначається при максимально допустимій напрузі між цими електродами.

Вихідний опір між стоком і витокм $R_{вих} = \Delta U_c / \Delta I_c$ при $U_{з-п} = \text{const}$ визначається в режимі насичення. Вихідний опір характеризується тангенсом кута нахилу вихідних характеристик до осі сили струму. Оскільки цей кут наближається до 90° , то вихідний опір виявляється досить великим (сотні кілоомів).

Температурна залежність сили витокового струму пов'язана зі зміною рухливості основних носіїв заряду в матеріалі каналу. Крутість S польових транзисторів зменшується з підвищенням температури. Крім того, з підвищенням температури знижується вхідний опір $R_{вх}$ і зростає сила струму I_c , що проходить через затвор, причому з підвищенням температури на кожні 10°C сила струму I_c майже подвоюється.

Особливістю польових транзисторів є наявність у них термостабільної точки, тобто точки, в якій сила стокового струму практично незмінна за різних температур. З підвищенням температури питомі провідність каналу зменшується внаслідок зниження рухливості носіїв заряду. Одночасно скорочується ширина $p-n$ -переходу, розширюється провідний переріз каналу й збільшується сила струму I_c . Ці два протилежні процеси за певного вибору робочої точки можуть взаємно компенсуватися.

§ 98. ТИРИСТОРИ

Чотиришаровий кремнієвий вентиль з двома електродами (анодом і катодом) називається диністором. Якщо крім анода й катода є третій (керуючий) електрод, то вентиль стає керованим і називається тристором. Тиристри, а також диністори виготовляють чотиришаровими: $p-n-p-n$ (рис. 143). Середня ділянка тиристора p має вивід — керуючий електрод B . В тому разі, коли керуючий електрод від'єднаний, тиристор перетворюється в диністор. Якщо між анодом і катодом вентиля буде прикладена невелика стала напруга у прямому напрямку, то переходи $П1$ і $П3$ будуть відкритими і їхній опір малий. Перехід $П2$ буде приєднаний у зворотному (непровідному) напрямку і його опір буде великим, тому вся прикладена до тиристора напруга буде практично на переході $П2$, а сила струму

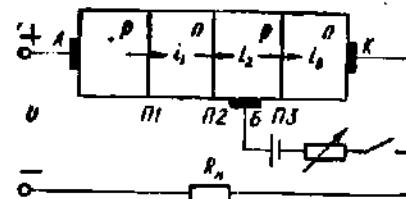


Рис. 143. Схема будови тиристора.

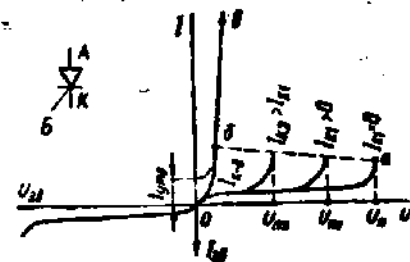
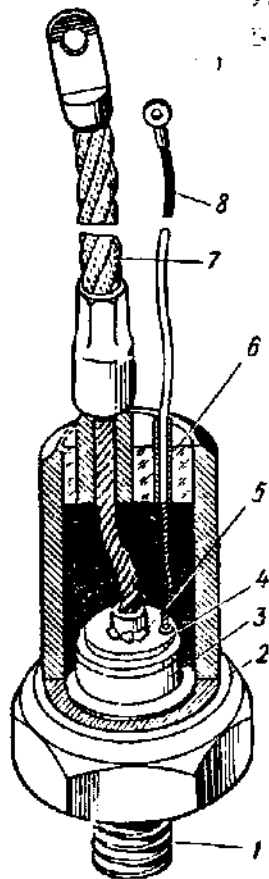


Рис. 144. Вольт-амперна характеристика тиристора та його умовне позначення.

в колі мала. З підвищенням напруги U на тиристорі сила струму в колі зростає незначною мірою, бо її зростання обмежується великим опором переходу $П2$, і вольт-амперна характеристика тиристора буде подібна до зворотного відгалуження діодної характеристики (крива $Оа$ на рис. 144). Якщо напруга досягне певного значення, що називається напругою перемикання U_p , то в переході $П2$ напруженість електричного поля стає достатньою для іонізації й утворення нових вільних носіїв зарядів (електронів і дірок), опір переходу $П2$ різко зменшується і тиристор відкривається. Напруга на відкритому тиристорі (ділянка $бв$ вольт-амперної характеристики) мала ($1...2$ В) і майже незмінна, а сила струму в колі обмежується опором зовнішнього навантаження.

Максимальна сила струму в тиристорі лімітується гранично допустимою потужністю, яку він розсіює. Якщо знизити силу струму через відкритий тиристор, то він залишатиметься відкритим доти, поки сила струму тиристора буде достатньою для підтримання процесу утворення носіїв зарядів у переході $П2$. Якщо сила струму менша від певного значення, що називається силою струму утримання $I_{утр}$, тиристор закривається, тобто повертається в непровідний стан.

Якщо на керуючий електрод подати позитивний потенціал від стороннього джерела, то в переході $П2$ виникне струм керування і з'являться додаткові носії зарядів, внаслідок чого зменшиться напруга перемикання цього переходу і тиристор відкриється при меншій напрузі $U_{п1}$. Чим вища сила струму керування I_k , тим більше додаткових зарядів у переході $П2$ і нижча напруга перемикання тиристора. За певного (достатнього) значення сили струму керування $I_{к,д}$ тиристор працюватиме як некерований вентиль, тобто буде відкритий при будь-якій додаткій напрузі на аноді. Отже, тиристор відкривається в разі подачі на анод напруги перемикання, а також струму керування достатнього значення $I_{к,д}$. Оскільки керуючий електрод після відкриття тиристора перестає впливати на його роботу, то в колі керуючого електрода протікає короткочасний імпульс струму прямокутної форми тривалістю приблизно 10 мкс.



Якщо на затискачі тиристора полати зворотню напругу $U_{зв}$, то він буде закритий зворотньо вимкнутими переходами $П1$ та $П3$ незалежно від сили керуючого струму і його вольт-амперна характеристика практично не відрізняється від зворотного відгалуження вольт-амперної характеристики некерованого вентиля.

Тиристор має два стійкі стани: якщо він закритий, його опір дуже великий ($R \sim \infty$), якщо відкритий — малий ($R \sim 0$). Тому тиристри застосовують як безконтактні перемикачі в інверторах, регульованих випрямлячах, у схемах захисту тощо.

Конструкцію потужного тиристора наведено на рис. 145. Чотиришарова кристалічна структура 4, закріплена на кристалотримачі 3, розміщена в металевому корпусі 2, в нижній частині якого знаходиться нарізний вивід катода 1. До верхнього p -шару припаяно 5 прикріплено плетений вивід анода 7. В середню p -ділянку введено вивід керуючого електрода 8. Виводи анода й керуючого електрода закріплені в корпусі ізолятором 6.

Рис. 145. Конструкція потужного тиристора.

Розділ XI. ГАЗОРОЗРЯДНІ ПРИЛАДИ ТА ФОТОСЕЛЕМЕНТИ

§ 99. ІОНІЗАЦІЯ ГАЗУ Й ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРЯД

На відміну від електронних (вакуумних) ламп в іонних, або газорозрядних приладах струм створюється не тільки спрямованим переміщенням вільних електронів, але й унаслідок переміщення заряджених часток газу чи ртутної пари — іонів. У звичайних умовах газ містить надзвичайно малу кількість вільних електронів та іонів (носіїв зарядів) і абсолютна більшість атомів і молекул газу електрично нейтральні (не заряджені). Тому в звичайних умовах газ є гарним діелектриком. Провідність газу може бути обумовлена його іонізацією сильним електричним полем, високою температурою, радіоактивними та космічними променями. Газ стає провідником, коли вміщує значну кількість носіїв заряду — вільних електронів та іонів. Процес утворення носіїв заряду називається іонізацією газу.

Іонні прилади наповнені розрідженим газом або ртутною парою. Електрони під час свого руху стикаються з атомами газу чи ртутною парою і віддають частину своєї енергії атомам газу. За досить великої швидкості руху електронна енергія, одержана атомом газу, виявляється достатньою для його збудження або іонізації. У збудженому атомі один з його електронів під дією одержаної під час співударяння енергії переходить на вищий енергетичний рівень (на віддаленішу від ядра орбіту) і через нестійкість цього положення дуже швидко повертається на свій попередній рівень, виділяючи надлишок енергії у вигляді світлового випромінювання, тобто газ починає світитися.

Якщо енергія, одержана атомами внаслідок співударяння, достатня для їхнього розщеплення на електрони та іони, то відбувається іонізація газу. Швидкість руху електронів та їхня кінетична енергія залежать від напруги, тобто збудження та іонізація атомів газу відбуваються за певних значень потенціалу збудження U_0 та потенціалу іонізації U_i , причому $U_i > U_0$. Наприклад, для ртутної пари $U_0 = 5$ В, $U_i = 10$ В.

Процес утворення носіїв зарядів внаслідок співударяння вільних електронів з атомами газу називається іонізацією співударянням або ударною іонізацією. Внаслідок співударяння вільні електрони можуть вибити електрони з нейтральних молекул (атомів) або приєднатися до них. У першому випадку утворюються іони, заряджені позитивно, у другому — заряджені негативно. Під дією електричного поля, утвореного напругою, прикладеною до електродів приладу, носії зарядів переміщуються в напрямку електричного поля (від позитивного електрода до негативного — позитивні іони і в протилежному напрямку — електрони та негативно заряджені іони). Зі збільшенням прикладеної напруги швидкість руху носіїв зарядів зростає.

Контрольні запитання

1. Поясніть будову атомів германію.
2. В чому відмінність електронної та діркової провідності?
3. Яка будова германієвого вентиля?
4. Поясніть принцип роботи транзистора.
5. Яка будова площинного германієвого транзистора?
6. Перерахуйте схеми приєднання транзисторів.
7. Зобразіть характеристики транзистора, приєднаного за схемою зі спільним емітером.
8. Яка будова тиристора?
9. Зобразіть вольт-амперну характеристику тиристора.

Під час безперервної іонізації газу зі сталою інтенсивністю, крім розщеплення атомів газу на електрони та іони, відбувається зворотний процес їх часткового з'єднання (рекомбінація), тобто перетворення в нейтральні атоми, і кількість носіїв зарядів в одиниці об'єму залишається сталою.

Якщо напругу між електродами (анодом і катодом) іонного приладу збільшити до певного значення, яке називається напругою запалювання U_0 , то швидкість руху електронів та їхня кінетична енергія стають достатніми, щоб під час зіткнення з нейтральними атомами іонізувати їх. Повоодержані вторинні заряди також іонізують нейтральні атоми газу, тобто процес іонізації розвивається лавиноподібно. Проміжок між електродами заповнюється іонізованим газом — газовою плазмою з високою провідністю. При цьому кількість вільних електронів, а також сила струму, що протікає через прилад, різко зростають і виникає т л і ю ч и й р о з р я д, який переходить у самостійний, що не потребує зовнішнього іонізатора для його підтримання. Тліючий розряд супроводжується світінням газу й характерним шиплячим звуком. Тліючий розряд підтримується при певній напрузі між електродами, яка дещо менша від напруги запалювання (на кілька вольтів). У цьому випадку позитивні іони, які мають відносно велику масу, ударяються об поверхню катода, нагрівають його й вибивають з нього вторинні електрони, які, рухаючись до анода, іонізують атоми газу, підтримуючи струм у приладі.

Якщо напруга між анодом і катодом буде меншою, ніж потрібно, то швидкість руху позитивних іонів знизиться і вони не зможуть вибити з катода електрони, внаслідок чого процес іонізації може припинитися.

Тліючий розряд використовується в неонових і цифрових лампах, тиратронах, стабілітронах та інших приладах. Якщо у приладі з тліючим розрядом збільшити силу струму понад максимально допустиму, то виникне дуговий розряд, який небезпечний для такого приладу, бо обумовлює руйнування катода внаслідок бомбардування його важкими позитивними іонами з великою силою.

Під час дугового розряду густина струму значно більша, ніж під час тліючого. Отже, дуговий розряд може виникнути в процесі тліючого розряду, якщо напругу на розрядному проміжку підвищити до певного значення, яке називається н а п р у г о ю з а п а л ю в а н н я д у г и. При цьому дуга підтримується внаслідок термоелектронної емісії катода, розпеченого ударами позитивних іонів, і розряд називається самостійним. Якщо термоелектронна емісія катода утворюється нагріванням катода від стороннього джерела живлення, то дуговий розряд буде не самостійним. Електрична дуга виникає як у розрідженому газі, так і за нормального тиску. Якщо зблизити два електроди до зіткнення, то місце їхнього зіткнення дуже нагрівається струмом, який протікає, і станеться іонізація міжелек-

тродного проміжку та виникнення дуги при розсунутих електродах. У електричній дузі дуже висока температура і яскравість, які збільшуються з підвищенням напруги. Вперше електричну дугу відкрив російський учений В. В. Петров у 1802 р. Вона використовується в електрозварюванні, електричних печах, потужних прожекторах.

Схожість із дуговим розрядом має і с к р о в и й р о з р я д, за якого відбувається короткочасний (імпульсний) пробій проміжка між двома електродами.

Крім перерахованих видів електричних розрядів, часто можна спостерігати к о р о н и й р о з р я д, який виникає на поверхні проводів малого перерізу або на загострених кінцях проводів, тобто там, де утворюються значні напруженості електричного поля. За деякого критичного значення напруженості поля відбувається розряд, обумовлений іонізацією газу і супроводжуваний слабким світінням, помітним у темряві. Такий розряд називається к о р о н о ю.

§ 100. ГАЗОТРОНИ

Г а з о т р о н являє собою двоелектродний іонний або газорозрядний прилад, призначений для випрямлення змінного струму. Скляний (або металевий) балон газотрона після створення в ньому вакууму заповнюється ртутною парою або інертним газом за низького тиску. Всередині балона розміщені два електроди (рис. 146). Анод 2 газотрона виконують із нікелю або графіту і вивід анода 1 розміщують у верхній частині колби; катод 3 вольфрамовий з нанесеним шаром оксиду. У потужних газотронах для зменшення теплових втрат катод розміщують всередині циліндричного екрану. Для розігрівання катод вивкають на низьку напругу розжарення: 2,5 В — у разі ртутного наповнення; 5 В — для інертного газу. Вища напруга розжарення не допускається, бо між катодними кінцями можливе виникнення дуги. Газ чи ртутна пара може іонізуватися під дією послідовного ступінчастого збудження атомів, якщо напруга буде значно меншою від потенціалу запалювання. Отже, сила струму розжарення значно більша (ампери й десятки амперів) від сили анодного струму. Тривалість розігрівання катода знаходиться в межах від кількох до двадцяти-тридцяти хвилин.

З підвищенням анодної напруги від нуля в газотроні виникає невеликої сили електронний струм, як і в вакуумному діоді, оскільки електрони в слабкому електричному полі переміщуються від катода до анода з малою швидкістю, недостатньою для іонізації газу. Цьому режимові роботи відповідає початкова ділянка вольт-амперної характеристики (рис. 147). Якщо анодну напругу підвищити до значення, яке дорівнює потенціалові запалювання U_0 , то електрони під дією електричного поля розвинути швидкість, достатню для збудження й іонізації атомів газу або ртутної пари, тобто у приладі почнеться

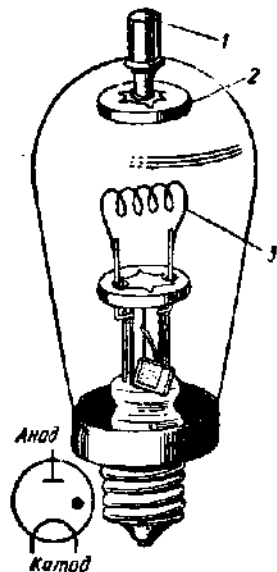
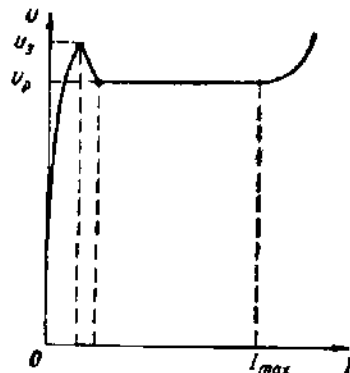


Рис. 146. Газотрон та його умовне позначення.

Рис. 147. Вольт-амперна характеристика газотрона.



процес іонізації газу, внаслідок чого утвориться плазма й виникне дуговий розряд. Під час запалювання газотрона анодна напруга зменшується до робочої напруги U_p , після чого залишається майже незмінною зі зміною сили струму в газотроні. Спад напруги на відкритому газотроні складається зі спадів поблизу анода, у плазмі та поблизу катода, де він завжди значно більший від перших двох і становить 10...20 В. Не допускається збільшення сили анодного струму вище максимальної, оскільки при цьому збільшується спад напруги поблизу катода і важкі позитивні іони з великою силою ударяють катод, внаслідок чого руйнується активний шар і газотрон виходить з ладу.

Недоліком газотронів є їх висока чутливість до зміни напруги розжарення, яка допускається в межах $+10$ і -5 % номінальної. Збільшення напруги розжарення вище номінальної призводить до розпорощення катода і зменшення терміну роботи газотрона. Якщо напруга розжарення менша від номінальної, то знижується температура катода й зменшується швидкість електронів, що вилітають із катода. Внаслідок цього збільшується спад напруги поблизу катода й зменшується допустима максимальна сила струму, тобто руйнування катода починається при меншій силі анодного струму. Катод руйнуватиметься також, якщо приєднати навантаження, коли він буде недостатньо нагрітий. Тому перед приєднанням навантаження катод слід прогріти протягом часу, зазначеного в паспорті газотрона. Нові газотрони перед ввімкненням прогривають з малою силою анодного

струму для видалення нальотів і плям, які можуть з'явитися на електродах під час виготовлення газотронів.

Наповнені ртутною парою газотрони працюють довший строк, ніж наповнені інертним газом, але у разі ртутного наповнення газотрони чутливіші до зміни температури навколишнього середовища.

§ 181. ТИРАТРОНИ

Тиратрон відрізняється від газотрона наявністю третього електрода — сітки, яка керує моментом запалювання дуги. У скляному балоні тиратрона (рис. 148), наповненому сумішню інертних газів, розміщують анод 2, катод 5 і сітку 3. На рис. 148 зображено тиратрон з катодом непрямого розжарення, хоча часто тиратрони роблять і з прямим розжаренням. Катод оточений металевим екраном 6, який виключає можливість виникнення електричного поля між анодом і катодом поза сіткою. У верхній частині екран закритий сіткою, яка має форму диска з отворами. Вивід анода 1 знаходиться у верхній частині балона, виводи 7 катода й сітки — на цоколі, в нижній частині балона.

На відміну від вакуумного триода в тиратроні зміна потенціалу сітки не впливає на силу анодного струму, а

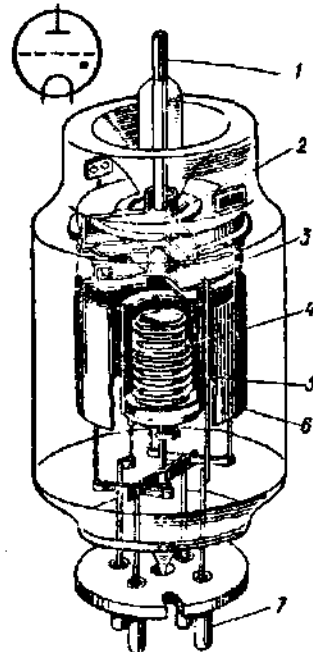


Рис. 148. Будова тиратрона з катодом непрямого розжарення та його умовне позначення.

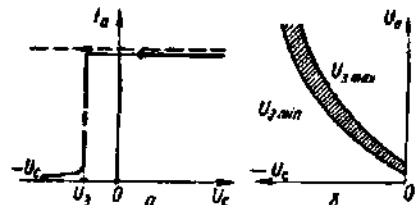


Рис. 149. Характеристики тиратрона: а — анодно-сіткова; б — пускова.

зміщує момент запалювання приладу, тобто момент утворення дуги. Після запалювання тиратрона сітка втрачає керувальну дію і гасить дугу, отже заперти тиратрон, змінюючи потенціал сітки, неможливо.

На рис. 149, а зображено анодно-сіткову характеристику тиратрона. За досить великої від'ємної напруги на сітці відносно катода

електричне поле між сіткою й катодом, спрямоване назустріч основному полю тиратрона, перешкоджатиме рухові електронів до анода і сила анодного струму дорівнюватиме нулеві, тобто тиратрон буде запертий. Зі зменшенням від'ємної напруги на сітці до певного значення в анодному колі з'явиться струм дуже малої сили, який зі зменшенням від'ємної напруги на сітці поступово збільшуватиметься, як і в вакуумному тріоді. Зі зменшенням сіткової напруги до U_c — напруги запалювання швидкість руху електронів стає достатньою для іонізації газу, виникає дуга й утворюється плазма, тобто тиратрон відкривається. Запалювання тиратрона супроводжується стрибкоподібним збільшенням сили анодного струму до певного значення, яке залежить від анодної напруги та опору навантаження R_n . Після запалювання дуги сіткова напруга не впливає на силу анодного струму. Якщо на сітку подавати додатну напругу $+U_c$, то її потенціал буде компенсований електронами й негативними іонами, які оточують сітку. Від'ємний потенціал сітки $-U_c$ компенсується позитивними іонами. Отже, сітка, втрачає свою керувальну дію і заперти лампу можна лише зниженням анодної напруги до нуля. Для обмеження сіткових струмів у коло сітки вводять опір $1...100$ кОм.

При певній напрузі між сіткою й катодом запалювання тиратрона відбувається за певної анодної напруги, яка дорівнює напрузі запалювання ($U_a = U_s$). Отже, змінюючи сіткову напругу, можна регулювати анодну напругу $U_a = U_s$, за якої виникає дуга. Крім сіткового потенціалу, на напругу запалювання U_s впливає тиск всередині балона, температура навколишнього середовища, сила струму розжарення, опір сіткового кола та інші фактори. Тому за певної сіткової напруги запалювання тиратрона може статися при анодній напрузі, що перебуває в межах від $U_{a \min}$ до $U_{a \max}$, і пускова характеристика тиратрона (рис. 149, б) визначається ділянкою, що знаходиться між кривими $U_{a \min}$ та $U_{a \max}$.

Вольт-амперна характеристика тиратрона $U_a = f(I_a)$ має такий же вигляд, як і в газотрона.

Тиратрони застосовують у регульованих випрямлячах, перетворювачах постійного струму у змінний (в інверторах), у схемах автоматичного регулювання, керування, захисту тощо.

Тиратрон з холодним катодом являє собою іонний прилад із тліючим розрядом. Це скляний балон, заповнений сумішшю інертних газів (аргон—неон, аргон — гелій та ін.). Всередині балона розміщено три електроди: анод, катод і сітка. З подачею між сіткою й катодом напруги U_c виникає електричне поле, під дією якого утворюється початкова іонізація і з'являється тихий, або темний розряд. Якщо на сітку буде подано додатний імпульс напруги, то сила струму в сітковому колі збільшиться і тихий розряд між катодом і сіткою перейде в тліючий. Якщо напруга між анодом і катодом U_a достатня для підтримання цього розряду, то він перекидається на

анод, після чого тиратрон запалюється і сітка припиняє впливати на силу струму в тиратроні. Для гасіння тиратрона анодну напругу треба знизити так, щоб вона стала меншою від робочої.

Позитивними якостями тиратронів з холодним катодом є малі габарити й маса, висока механічна міцність, значна тривалість функціонування, відсутність розжарення, широкий діапазон робочих температур (від -60 до $+100$ °С). Недолік таких тиратронів — нестабільність характеристик.

§ 102. РТУТНІ ВЕНТИЛІ

Робота ртутного вентиля ґрунтується на використанні автоелектронної емісії й іонізації ртутної пари. Ці вентиля належать до приладів із самостійним дуговим розрядом і застосовуються у випрямлячах великої потужності з силою струмів до кількох тисяч ампер та напругами до 15 кВ і вище.

Найпростіший однофазний ртутний вентиль (рис. 150) виконаний у вигляді скляної колби, з якої викачає повітря.

У колбі розміщено два сталеві або графітні аноди $A1$ та $A2$. Нижня частина колби заповнена ртуттю, яка служить катодом. Туди ж впаваю заповнений ртуттю скляний відросток, який є анодом запалювання. Для запалювання вентиля в мережу приєднують основний і допоміжний трансформатори Tr_o і Tr_d , замикають рубильник $P2$ і нахилиють колбу так, щоб ртуть анода запалювання $A3$ з'єдналася з катодом. При цьому під дією напруги вторинної обмотки допоміжного трансформатора Tr_d в колі анода $A3$ і катода протікає струм. Коли колба повертається у вихідне положення, контакт між ртуттю анода $A3$ і катода розривається і між ними утворюється електрична дуга, а на ртуті катода виникає невелика світна пляма з високою температурою. Під дією теплоти ртуть випаровується і поблизу ртуті катода створюється електричне поле такої високої напруженості, що вириває вільні електрони з поверхні ртуті, тобто виникає автоелектронна (або електростатична) емісія. Електрони, що вилетіли з катода,

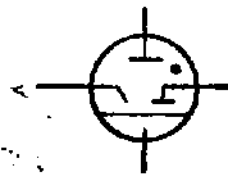
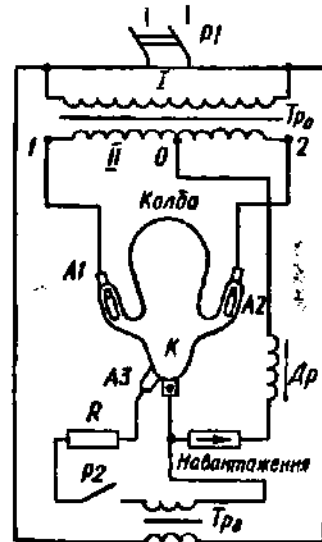


Рис. 150. Принципова схема ртутного випрямляча та умовне позначення вентиля.

спрямовуються до анода ($A1$ або $A2$), який має додатний потенціал відносно катода. На своєму шляху вони стикаються з молекулами ртутної пари й іонізують їх, тобто відокремлюють від них електрони й утворюють позитивні іони, які удараються об катод і підтримують температуру катодної плями. У разі зміни за знаком потенціалу на аноді внаслідок зміни напруги вторинної обмотки основного трансформатора T_p , дуга в колбі перекидається на другий анод, який у цей момент має додатний потенціал, тобто дуга з'єднує катод по чергово з кожним анодом.

Оскільки температура катодної плями висока, то диск ртутної пари в колбі великий і для підвищення допустимих зворотних напруг анод розміщують у вузьких відростках — рогах, щоб підвищити інтенсивність охолодження і знизити тиск ртутної пари біля нього. У процесі роботи вентиля на внутрішній поверхні рогів осідає ртутна пара, яка є носієм негативних зарядів і відіграє роль сітки з негативним зарядом. Ці заряди перешкоджають запалюванню колби, підвищуючи потенціал запалювання. Щоб компенсувати ці негативні заряди, на роги колби надівають «манжети», з'єднані з анодами, тому за додатного анодного потенціалу «манжета», з'єднана з ним, також матиме додатний потенціал.

Крім робочих анодів $A1$ та $A2$, ртутний вентиль може мати ще допоміжні аноди, які під час вмикання вентиля запалюють дугу й підтримують її, коли навантаження знімається. Такий вентиль називається екситроном, його умовне позначення наведено на рис. 150. Екситрон може мати 3 або 6 робочих анодів.

Останнім часом замість крихких скляних колб застосовують металеві з повітряним або водяним охолодженням.

Ртутний вентиль, який не має допоміжних анодів збудження, називається ігнітроном. Крім анода й катода, у ігнітрона є запалювач, який іскрою запалює дугу на початку кожної додатної половини змінної напруги. Ігнітрон виготовляють у металевому корпусі з водяним охолодженням, всередині якого розміщуються графітовий анод, ртутний катод та запалювач з карбіду бору. Позитивні якості ігнітрона — малі габарити, високий ККД, невеликий спад напруги (15...20 В).

Вольт-амперна характеристика ртутного вентиля подібна до характеристики газотрона.

§ 203. ФОТОЕЛЕМЕНТИ З ЗОВНІШНІМ ФОТОЕФЕКТОМ. ФОТОПОМНОЖУВАЧІ

Фотоелементом називається електровакуумний, напівпровідниковий або іонний прилад, у якому дія променевої енергії оптичного діапазону обумовлює зміну його електричних властивостей.

Зовнішній фотоэффект, або фотоелектронна емісія, полягає в тому, що джерело випромінювання надає частині електронів додаткової енергії, достатньої для виходу їх з речовини в навколишнє середовище (вакуум або розріджений газ). У вакуумних або електронних фотоелементах рух електронів відбувається у вакуумі; у газонаповнених чи іонних фотоелементах електрони переміщуються у розрідженому газі й іонізують атоми газу.

Фотоелемент з зовнішнім фотоэффектом (рис. 151, а) розміщений у скляній колбі 2, де створено вакуум (у вакуумному фотоелементі) або яку після відкачування повітря заповнено розрідженим газом (аргоном з низьким тиском — в іонних фотоелементах). Внутрішню поверхню колби, за винятком невеликого «вікна» для проходження світлового потоку 1, покрито фотокатодом 3, що являє собою шар срібла з нанесеним на нього напівпровідниковим шаром оксиду цезію. Анод 4 фотоелемента виготовлено у вигляді кільця, щоб він не перекривав шлях світловому потоку до катода. Колбу розміщують у пластмасовому цоколі 5, у нижній частині якого знаходяться контактні штирки 6 з виводами від анода й катода.

Під дією прикладеної напруги U джерела живлення між анодом і катодом фотоелемента утворюється електричне поле, й електрони, що вилітають з освітленої поверхні катода, спрямовуються до позитивно зарядженого анода. Отже, в колі встановлюється фотострум I_{Φ} , залежність якого від світлового потоку Φ за незмінної напруги джерела живлення $[I_{\Phi} = f(\Phi)]$ називається світловою характеристикою.

В іонному фотоелементі електрони іонізують атоми газу й збільшують потік електронів, тобто збільшують силу струму фотоелемента, підвищуючи його чутливість.

Фотоелектронна емісія і фотострум фотоелемента залежать від довжини хвилі світлового випромінювання, тому, крім світлової чутливості, фотоелемент характеризується спектральною чутливістю.

Анодні вольт-амперні характеристики фотоелемента показують залежність сили струму від прикладеної до затискачів фотоелемента напруги за незмінного світлового потоку, що освітлює фотокатод,

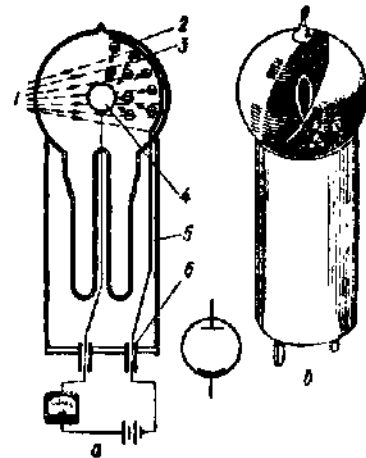


Рис. 151. Фотоелемент з зовнішнім фотоэффектом:
а — схеми рмквання; б — зовнішній вигляд та умовне позначення

тобто $I_{\Phi} = f(U)$ при $\Phi = \text{const}$. У електронного фотоелемента сила фотоструму спочатку швидко зростає зі збільшенням напруги, потім її зростання сповільнюється і, нарешті, майже зовсім припиняється, тобто настає режим насичення (рис. 152, а). Для іонного фотоелемента анодна вольт-амперна характеристика після горизонтальної ділянки (електронний потік) піднімається вгору внаслідок іонізації газу (рис. 152, б).

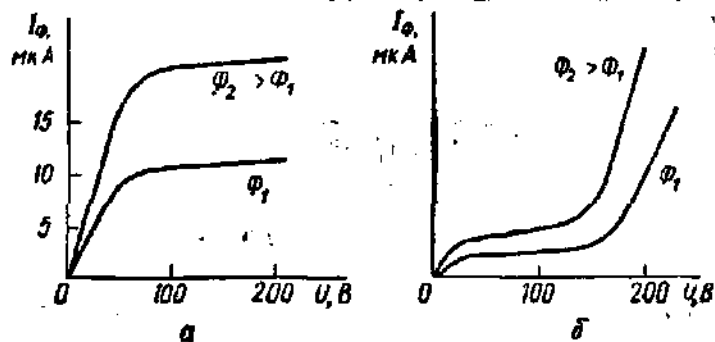


Рис. 152. Анодні вольт-амперні характеристики фотоелементів: а — електронного; б — іонного.

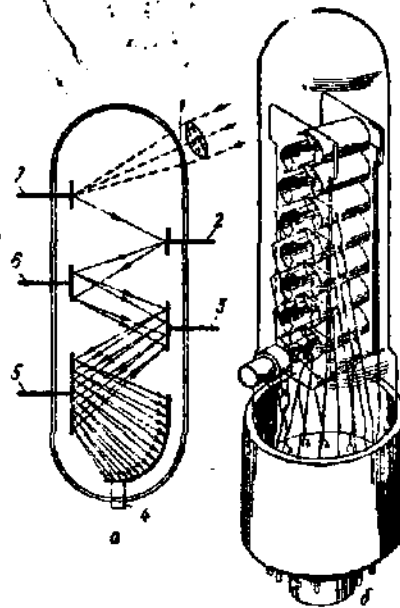
У процесі роботи фотоелемента його параметри з часом змінюються, тобто проявляється їхня властивість «стомлюваності». Фотоелемент використовують разом з ламповим або транзисторним підсилювачем через малу силу фотоструму, який можна одержати від фотоелемента.

Поряд з фотоелементами існують фотоелектронні прилади з підсиленням фотоструму, які називаються фотоелектронними помножувачами. Це прилади з зовнішнім фотоелементом, у яких підсилення фотоструму відбувається під дією вторинної електронної емісії. У скляному балоні, крім фотокатада й анода, розміщено ряд вторинних емісійних катодів (рис. 153), поверхня яких покрита емісійною речовиною. Між цими емісійними катодами встановлюється різниця потенціалів приблизно 100 В, яка в міру віддалення від фотокатада до анода збільшується. З поверхні освітленого фотокатада вилітають первинні електрони під дією електричного поля між катодом та емісійним катодом — емітером вторинних електронів першого каскаду, спрямовуються на цей емітер і вибирають з його поверхні вторинні електрони, кількість яких у кілька разів більша від кількості електронів, що потрапили на емітер первинних електронів.

Під дією електричного поля, утвореного між емітерами першого й

Рис. 153. Фотопомножувач:

а — принципова схема; 1 — фотопомножувач типу ФЕУ-22; 2 — світловий потік; 3 — перший каскад; 4 — третій каскад; 5 — анод; 6 — четвертий каскад; 7 — другий каскад; 8 — фотокатод



другого каскадів, електрони, що вилетіли з емітера першого каскаду, з великою швидкістю вдаряються об емітер другого каскаду й вибивають з його поверхні вторинні електрони, яких також у кілька разів більше, ніж електронів, що потрапили на нього. Збільшений потік вторинних електронів з емітера другого каскаду потрапляє на емітер третього каскаду, підсилюється третім і четвертим каскадами й досягає анода фотопомножувача. Отже, у фотопомножувачі відбувається багаторазове збільшення кількості вторинних електронів, тобто підсилення фотоструму.

Фотоелектронні помножувачі застосовують для вимірювання дуже малих світлових потоків (до 10^{-8} лм). Сила їх вихідного струму не перевищує кількох десятків міліампер.

§ 104. ФОТОЕЛЕМЕНТИ З ВНУТРІШНІМ ФОТОЕФЕКТОМ ТА З ЗАПІРНИМ ШАРОМ

Внутрішній фотоелемент полягає в тому, що джерело випромінювання світлової енергії обумовлює збільшення енергії в частини електронів, іонізацію атомів і утворення нових носіїв зарядів (електронів і дірок), внаслідок чого зменшується електричний опір освітлюваного матеріалу. Якщо за зовнішнього фотоелементу електрони покидають межі освітлюваної речовини, то за внутрішнього фотоелементу вони залишаються всередині неї, збільшуючи кількість носіїв електричних зарядів.

Фотоелементи з внутрішнім фотоелементом називаються фоторезисторами (фоторезисторами). Вони являють собою напівпровідникові прилади, електричний опір яких різко змінюється під дією падаючого на них світлового випромінювання. Напівпровідниками служать сірчистий свинець (фоторезистор ФСА), селенід кадмію (фоторезистор ФСД), сірчистий кадмій (фоторезистор ФСК). Фоторезистори ФСА застосовують у інфрачервоній, а інші — у видимій частині світла. Чутливість фоторезисторів значно вища від чутливості фото-

елементів із зовнішнім фотоелементом, тому в ряді пристроїв фоторезистори заміняють раніше використовувані фотоелементи з зовнішнім фотоелементом.

Фоторезистор (рис. 154, а) являє собою скляну пластинку 1, на яку нанесено точкий шар напівпровідника 2, покритого прозорим лаком для захисту від механічних пошкоджень і вологи. Від обох

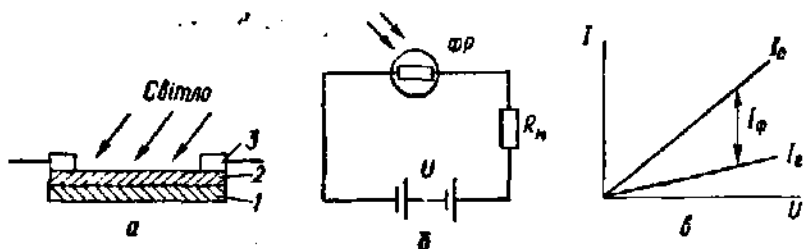


Рис. 154. Фоторезистор:

а — будова; б — схема приєднання та умовне позначення: « — вольт-амперна характеристика

кінців пластинки виведено два металеві електроди 3. Фоторезистор розміщено в пластмасовому корпусі з двома штирками, до яких приєднано електроди. Умовне позначення та схему приєднання фоторезистора наведено на рис. 154, б. Фоторезистор працює лише від зовнішнього джерела живлення й має однаковий опір в обох напрямках.

У неосвітленого фоторезистора є великий «темновий» опір R (від сотень кілоомів до кількох мегаомів), через який протікає «темновий» струм малої сили $I_т$. У освітленого фоторезистора опір різко зменшується і сила струму збільшується до певного значення сили світлового струму I_c , яке залежить від інтенсивності освітлення. Різниця між силами світлового та «темнового» струмів називається силою фотоструму: $I_ф = I_c - I_т$. Вольт-амперна характеристика фоторезистора (рис. 154, в), тобто залежність сили фотоструму від напруги джерела живлення за незмінного світлового потоку $I_ф = f(U)$ при $\Phi = \text{const}$, лінійна.

До недоліків фоторезисторів належать їх інерційність (з освітленням сила фотоструму не зразу досягає свого кінцевого значення, а лише через деякий час), нелінійність світлової характеристики (сила фотоструму зростає повільніше, ніж сила світла), залежність електричного опору й сили фотоструму від температури навколишнього середовища.

Фотоелементи з фотоелементом у запірному шарі називаються вентильними фотоелементами. Запірний шар знаходиться між напівпровідниками з p - та n -провідностями. У цих фотоелементах під дією світлового випромінювання виникає ЕРС, яка назива-

ється фото-ЕРС. Для виготовлення вентильних фотоелементів застосовують селен, сірчистий талій, сірчисте срібло, германій і кремій.

Освітлення поверхні фотоелемента поблизу $p-n$ -переходу обумовлює іонізацію атомів кристалу й утворення нових пар вільних носіїв зарядів — електронів і дірок. Під дією електричного поля $p-n$ -переходу утворювані внаслідок іонізації атомів кристалу електрони переходять у шар n , а дірки в шар p , що призводить до надлишку електронів у шарі n та дірок — у шарі p . Під дією різниці потенціалів (фото-ЕРС) між шарами p і n у зовнішньому колі протікає струм силою I , спрямований від електрода з шаром p до електрода з шаром n . Ця сила струму залежить від кількості носіїв зарядів — електронів і дірок, тобто від сили світла. Чутливість вентильних фотоелементів висока (до 10 мА/лм), їм не потрібне джерело живлення. Вони широко застосовуються в різних галузях електроніки, автоматики, виміральної техніки тощо.

Схему будови кремнієвого фотоелемента з запірним шаром показано на рис. 155. На пластину кремнію 1 з домішкою, яка утворює електронну провідність, вводять домішку бору шляхом дифузії у вакуумі, внаслідок чого утворюється шар напівпровідника з дірковою провідністю 2 дуже малої товщини, тому світлові промені вільно проходять у перехідну зону. Батареї кремнієвих елементів служать для безосереднього перетворення сонячної енергії в електричну. Такі перетворювачі, що називаються сонячними батареями, застосовуються, наприклад, на штучних супутниках Землі для живлення їхньої апаратури.

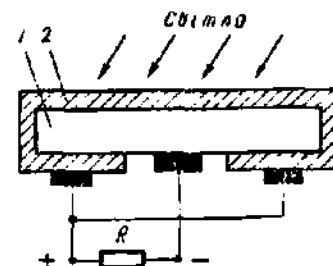


Рис. 155. Схема будови кремнієвого вентильного фотоелемента.

Напівпровідниковий фотоелемент з двома електродами, розділеними $p-n$ -переходом, який називається фотодіодом, може працювати з зовнішнім джерелом живлення (перетворювальний режим) і без нього (генераторний режим).

Під час роботи в генераторному режимі освітлення фотодіода обумовлює виникнення фото-ЕРС, під дією якої у зовнішньому колі через навантаження протікає струм, тобто джерелом живлення є фотодіод. Під час роботи у фотоперетворювальному режимі напругу зовнішнього джерела живлення прикладено назустріч фото-ЕРС і фотодіод схожий на фоторезистор з високою чутливістю. Якщо фотодіод не освітлений, то через нього протікає зворотний струм («темновий» струм) невеликої сили під дією зовнішнього джерела живлення. З освітленням електронної ділянки фотодіода утворюються носіїв зарядів — електрони й дірки. Дірки доходять до $p-n$ -переходу й під дією електричного поля переходять в p -ділянку, тобто освітлення обумов-

лює збільшення кількості неосновних носіїв, що перейшли з n -ділянки в p -ділянку, отже, сила струму в колі зростає (виникає фото-струм).

Контрольні запитання

1. Чому у звичайних умовах газ є діелектриком?
2. Поясніть процес іонізації газу.
3. Які прилади називаються іонними?
4. Розкажіть про будову газотрона.
5. Зобразіть вольт-амперну характеристику газотрона.
6. Поясніть роботу тиратрона з розжарювальним катодом.
7. У чому полягає принцип роботи ртутного випрямляча?
8. Які прилади називаються фотоелементами з зовнішнім та внутрішнім фото-ефектом?

ЗМІСТ

Передмова	2
Розділ I.	
Постійний струм. Кола постійного струму	5
§ 1. Електричне коло постійного струму	5
§ 2. Електрорушійна сила	6
§ 3. Електричний опір	7
§ 4. Закон Ома	8
§ 5. Послідовне з'єднання резисторів	10
§ 6. Перший закон Кірхгофа	11
§ 7. Паралельне й змішане з'єднання резисторів	12
§ 8. Другий закон Кірхгофа	14
§ 9. Розрахунок складних електричних кіл	15
§ 10. Робота і потужність електричного струму	18
§ 11. Закон Ленца — Джоуля	21
§ 12. Нагрівання провідників електричним струмом	21
§ 13. Нелінійні опори	23
Розділ II.	
Хімічна дія електричного струму	25
§ 14. Електроліз	25
§ 15. Закони Фарадея	26
§ 16. Гальванічні елементи	28
§ 17. Акумулятори	30
Розділ III.	
Магнетизм та електромагнетизм	36
§ 18. Магніти і їх властивості	36
§ 19. Магнітне поле електричного струму	37
§ 20. Провідник зі струмом у магнітному полі. Магнітна індукція	38
§ 21. Напруженість магнітного поля. Закон повного струму	40
§ 22. Магнітна проникність. Магнітний потік	41
§ 23. Взаємодія провідників зі струмами	42

§ 24. Гістерезис	43
§ 25. Електромагнітна індукція	46
§ 26. Самоіндукція	50
§ 27. Енергія магнітного поля	52
§ 28. Взаєміндукція	53

Розділ IV.

Змінний струм і кола змінного струму	55
§ 29. Одержання змінної електрорушійної сили	55
§ 30. Синусоїдна електрорушійна сила	57
§ 31. Активний опір у колі змінного струму	59
§ 32. Котушка індуктивності в колі змінного струму	61
§ 33. Коло змінного струму з активним та індуктивним опором	63
§ 34. Конденсатор у колі змінного струму	64
§ 35. Коло змінного струму з активним і ємнісним опором	66
§ 36. Коло змінного струму з активним, індуктивним та ємнісним опором	67
§ 37. Паралельне з'єднання реактивних опорів. Резонанс струмів	69
§ 38. Потужність змінного струму	72
§ 39. Трифазна система змінного струму	73
§ 40. З'єднання обмоток генератора	75
§ 41. Ввікнення навантаження в мережу трифазного струму	78
§ 42. Потужність трифазного струму	80
§ 43. Обертове магнітне поле	82

Розділ V.

Електричні вимірювання та електровимірювальні прилади	87
§ 44. Загальні відомості та класифікація приладів	87
§ 45. Прилади електромагнітної системи	91
§ 46. Прилади магнітоелектричної системи	93
§ 47. Прилади електродинамічної системи	94
§ 48. Прилади індукційної системи	96
§ 49. Прилади вібраційної системи	97
§ 50. Вимірювання сили струму та напруги	98
§ 51. Вимірювання опорів	99
§ 52. Логометри	101
§ 53. Вимірювання потужності та енергії	102
§ 54. Вимірювання неелектричних параметрів	103
§ 55. Цифрові прилади	105

Розділ VI.

Трансформатори	106
§ 56. Загальні відомості про трансформатори	106
§ 57. Принцип дії та будова трансформатора	107
§ 58. Робочий режим трансформатора	111
§ 59. Трифазні трансформатори	115

§ 60. Дослід холостого ходу й короткого замикання	117
§ 61. Визначення робочих властивостей трансформаторів за ланими дослідів холостого ходу й короткого замикання	118
§ 62. Автотрансформатори	120
§ 63. Вимірювальні трансформатори	122

Розділ VII.

Електричні машини змінного струму	124
§ 64. Загальні положення	124
§ 65. Принцип дії асинхронного двигуна	126
§ 66. Будова асинхронного двигуна	172
§ 67. Робота асинхронного двигуна під навантаженням	130
§ 68. Обертаючий момент асинхронного двигуна	131
§ 69. Робочі характеристики асинхронного двигуна	133
§ 70. Пуск асинхронних двигунів	135
§ 71. Двигуни з поліпшеними пусковими характеристиками	137
§ 72. Регулювання частоти обертання трифазних асинхронних двигунів	138
§ 73. Однофазні асинхронні двигуни	140
§ 74. Принцип дії та будова синхронного генератора	142
§ 75. Робота синхронного генератора під навантаженням	145
§ 76. Синхронні двигуни	148

Розділ VIII.

Електричні машини постійного струму	151
§ 77. Принцип дії та будова генератора постійного струму	151
§ 78. Якірні обмотки та ЕРС машини постійного струму	154
§ 79. Магнітне поле машини постійного струму за наявності навантаження	157
§ 80. Комутація струму	159
§ 81. Робота машини постійного струму в режимі генератора	161
§ 82. Характеристики генераторів постійного струму	166
§ 83. Робота машини постійного струму в режимі двигуна	171
§ 84. Пуск двигунів постійного струму	174
§ 85. Характеристика та регулювання частоти обертання двигунів постійного струму	176
§ 86. Втрати та ККД машини постійного струму	178
§ 87. Універсальні колекторні двигуни	179

Розділ IX.

Електронні прилади	181
§ 88. Електронна емісія	181
§ 89. Електроди електровакуумних ламп	182
§ 90. Двоелектродні електронні лампи (діоди)	186
§ 91. Триелектродні електронні лампи (тріоди)	189

§ 92. Багатосіткові електронні лампи	192
§ 93. Електронно-променеві трубки, Осцилографи	195
Розділ X.	
Напіпровідникові прилади	199
§ 94. Електропровідність напіпровідників	199
§ 95. Напіпровідникові діоди	202
§ 96. Біполярні транзистори	307
§ 97. Польові транзистори	212
§ 98. Трискори	216
Розділ XI.	
Газорозрядні прилади та фотоелементи	219
§ 99. Іонізація газу й електричний розряд	219
§ 100. Газотрони	221
§ 101. Тиратрони	223
§ 102. Ртутні вентилі	225
§ 103. Фотоелементи з зовнішнім фотоелементом. Фотопомножувачі	226
§ 104. Фотоелементи з внутрішнім фотоелементом та з залірним шаром	229

Навчальне видання

Китаєв Валентин Євгенович

**ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
З ОСНОВАМИ ПРОМИСЛОВОЇ
ЕЛЕКТРОНІКИ**

Переклад з російської

Художник обкладинки *О. П. Мороз*
Художній редактор *Б. В. Сушко*
Технічний редактор *О. Г. Манілова*
Коректор *Н. М. Мірошніченко*

Здано на складання 22.02.94. Підписано до друку 20.07.94. Формат 60×84^{1/4}. Папір друкарський № 2. Гарнітура літературна. Друк високим. Ум. друк. арк. 13,96. Ум. фарбо-відбитків 13,96. Обл.-вид. арк. 15,11. Зак. № 297.

Видавництво «Гудівельник», 251053, Київ, вул. Обсерваторна, 25.

Надруковано з матриць Головного підприємства республіканського виробничого об'єднання «Поліграфмаш», 252057, Київ-57, вул. Довженка, 3 на Білоцерківській книжковій фабриці, 258400, м. Біла Церква, вул. Леся Курбаса, 4.